



De l'Isoarchie pour le Pilotage des Systèmes de Production

Patrick Pujo

► To cite this version:

Patrick Pujo. De l'Isoarchie pour le Pilotage des Systèmes de Production. Automatique / Robotique. Université Paul Cézanne - Aix-Marseille III, 2009. tel-00654463

HAL Id: tel-00654463

<https://theses.hal.science/tel-00654463>

Submitted on 23 Dec 2011

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



UNIVERSITE PAUL CEZANNE AIX-MARSEILLE III

HABILITATION À DIRIGER DES RECHERCHES

Patrick PUJO

Maître de Conférences Hors Classe - 61^{ème} section

Docteur de l'Université Paul Cézanne d'Aix Marseille III

Agrégé de Génie Mécanique, ancien élève de l'ENS de Cachan

DE L'ISOARCHIE POUR LE PILOTAGE DES SYSTEMES DE PRODUCTION

mémoire

présenté et soutenu publiquement

le **02 décembre 2009** devant le jury composé de :

R achid	B OUCHAKOUR,	Professeur à l'Université de Provence	(invité)
C laudia	F RYDMAN,	Professeur à l'Université Paul Cézanne	(examineur)
B ernard	G RABOT,	Professeur à l'ENIT de Tarbes	(rapporteur)
J ean- C laude	H ENNET,	Directeur de Recherche CNRS	(examineur)
P ierre	L ADET,	Professeur à l'INPG de Grenoble	(rapporteur)
G érard	M OREL,	Professeur à l'Université de Nancy I	(président)
D amien	T RENTESAUX	Professeur à l'Université de Valenciennes	(rapporteur)

A tous ceux qui me sont essentiels...

REMERCIEMENTS

Mes activités de recherche s'effectuent au sein du Laboratoire de Sciences de l'Information et des Systèmes (LSIS), dirigé par Mustapha Ouladsine, Professeur à l'Université Paul Cézanne.

Sur le plan des activités pédagogiques, je dispense mes enseignements à Polytech'Marseille, école d'ingénieurs rattachée à l'Université de Provence et dirigée par David Zeitoun, et plus précisément au sein du département Génie Industriel et Informatique, dont le Directeur est Charles Santoni.

Que Mustapha, David et Charly trouve ici l'expression de ma reconnaissance pour leurs efforts pour maintenir la dynamique et l'animation du cadre de travail dans lequel nous évoluons quotidiennement.

Ce mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches est l'aboutissement de nombreuses années d'efforts et de travail. Ce travail aurait pu ne jamais atteindre une telle finalité sans l'apport de deux personnalités remarquables qui ont influencé sans conteste mon devenir scientifique.

Avant toute chose, je souhaite exprimer ma sincère gratitude à Norbert Giambiasi, Professeur à l'Université Paul Cézanne, créateur et premier Directeur du LSIS. Tout en mettant en place il y a déjà une dizaine d'années cet environnement propice à l'épanouissement des enseignants chercheurs, il a su, avec tact, discernement, mais sans complaisance, me montrer l'état de ma situation scientifique et m'aider à dessiner la voie à suivre pour redresser cela. Ensuite, une fois les choses relancées, il a eu l'obligeance de me laisser toute l'autonomie nécessaire à mon caractère, en me laissant développer mes activités tout en continuant à m'apporter son soutien à chaque fois que nécessaire. Cette attitude exemplaire de direction éclairée m'a permis de reconstruire un parcours scientifique cohérent. Je lui dois donc une large part de la maturité que j'ai acquise ces dernières années et cela restera pour moi un enseignement fondamental et une expérience sans égale lorsque je serai prochainement dans la situation inverse de direction de recherches et de responsabilité.

Ensuite, je souhaite également témoigner de ma profonde reconnaissance à Jean-Paul Kieffer, ancien Directeur du centre de l'ENSAM à Aix en Provence. Au-delà de notre collaboration pédagogique initiale en Génie Industriel et du partage de quelques galères dont je n'évoquerai pas ici le dénominateur commun, nos longues discussions scientifiques et philosophiques lors de nos nombreuses collaborations ultérieures ont débouché sur une amitié durable et chaleureuse, qui va au-delà de simples relations professionnelles. Son sens du contact et des relations humaines, sa précision dans les mots usités, sa capacité d'écoute, d'analyse et de conseils, son sens de l'anecdote et du partage de l'expérience et la simplicité tranquille de son professionnalisme sont autant de qualités qui me servent aujourd'hui d'exemples au quotidien.

Tous mes remerciements vont également à Pierre Ladet, Professeur à l'INPG de Grenoble, à Bernard Grabot, Professeur à l'ENIT de Tarbes et à Damien Trentesaux, Professeur à l'Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, qui m'ont fait tous les trois à la fois l'honneur et le plaisir d'accepter d'être rapporteur de ce travail de recherche. Notre communauté scientifique est relativement petite et nous nous croisons tous depuis fort longtemps. J'ai toutefois été fort agréablement surpris par l'enthousiasme spontané de chacun des trois pour accepter cette tâche de rapporteur, en une période de l'année où nous sommes tous contraints par de fortes charges. Par ailleurs, je les prie de m'excuser de ne pas leur avoir simplifié les choses : un énorme 'pavé' à examiner, avec un délai de réponse court. Aussi, ma plus vive reconnaissance n'a d'égale que leur diligence et leur réactivité dans cette tâche de rapporteur. Leurs expériences scientifiques complémentaires font en fait que je ne pouvais espérer de meilleur jury.

Ma reconnaissance va également à Gérard Morel, Professeur à l'Université de Nancy I, qui a accepté d'examiner mon travail, malgré la très lourde charge d'activités qui est la sienne. Je n'oublie pas que c'est un long échange scientifique, dans un terminal d'aéroport du nord de la France, qui s'est avéré ensuite être un véritable déclic pour l'orientation prise dans mes recherches récentes et je le remercie chaleureusement pour ce coup de pouce.

Je remercie également Claudia Frydman, Professeur à l'Université Paul Cézanne, et Jean-Claude Hennet, Directeur de Recherche CNRS d'avoir accepté de participer à ce jury au titre d'examineurs. Membre du LSIS, ils sont respectivement mon ancienne responsable d'équipe de recherche et mon actuel chef de projet recherche. Travailler à leur coté a été et est une chance pour moi. Au travers de leur présence, c'est l'ensemble des collègues et autres personnels du laboratoire, du département Génie Industriel et Informatique de Polytech'Marseille et de l'Université Paul Cézanne que je tiens à saluer et remercier.

Rachid Bouchakour, Professeur à l'Université de Provence, Directeur adjoint à la Recherche de Polytech'Marseille et Directeur de l'Institut Carnot STAR, a accepté mon invitation à participer à cette soutenance. Je le remercie pour toute la confiance qu'il m'a toujours témoigné ainsi que pour ses encouragements et conseils éclairés, qui m'ont permis ces derniers mois, lors de périodes difficiles, de continuer et de progresser. Il représente également l'ensemble des autres collègues et personnels de Polytech'Marseille, ainsi que mon autre Université de tutelle.

Je remercie également tous les partenaires industriels avec qui j'ai eu le plaisir de collaborer sur de nombreux projets correspondant à de véritables problématiques et sans lesquels le Génie Industriel ne trouverait que peu de réalité auprès des élèves ingénieurs.

Ce mémoire résulte d'un travail collectif, ou plus exactement participatif. En effet, au-delà d'un tandem (j'utilise le terme de tandem, pour mieux éviter celui de couple...) d'enseignants-chercheurs permanents constituant le noyau de ce groupe, de nombreux étudiants et stagiaires ont participé temporairement à ces recherches, en apportant ponctuellement leur propre savoir faire à l'édifice. Sans vouloir tous les citer, je n'oublie pas ceux qui ont laissé un souvenir plaisant, comme Mahnaz, Bagher, David, Massimo, Lynda, Mayssa, Fabien, Andreea, Mustapha, Adama...

Je rajouterai une mention toute particulière pour Nicolas, qui me fait l'honneur d'une amitié sincère et profonde depuis plus d'une décennie.

Ce groupe d'étudiants a pris de l'ampleur ces derniers temps, il est actuellement composé de Karen, Yves et Thamer, mes doctorants, de Memya, Selma et Afef, qui suivent le Master Recherche SIS, de Selim et Ceyda, qui sont accueillis dans le cadre de leur stage de fin d'études, et d'une quinzaine d'élèves ingénieurs du département GII, œuvrant dans le cadre de divers projets pédagogiques. Que tous soient assurés de mon soutien et qu'ils soient tous remerciés pour leur implication dans tous nos projets et pour leurs contributions respectives à nos travaux scientifiques.

Enfin, il en est UNE qui me supporte au quotidien, à la ville comme à l'Université, qui m'est totalement indispensable et qui mérite beaucoup plus que tout autre tous les remerciements que je ne saurais jamais lui exprimer. Sans ELLE, il n'y aurait jamais rien eu de tout cela, et tout cela ne servirait à rien...

Elle se reconnaîtra... tout le monde la reconnaîtra... mais personne ne l'appréciera jamais plus que moi.

AVANT PROPOS

L'essentiel de mon parcours professionnel au cours de ces vingt dernières années est concentré dans ce mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches.

Enseignant de formation, mon activité d'universitaire a toujours été caractérisée par d'importants volumes d'activités pédagogiques et une tendance naturelle au contact avec les étudiants. Toutefois, j'ai constamment maintenu une activité de recherche régulière et suivie, mais sans pouvoir toujours consacrer suffisamment de temps à la diffusion et à la valorisation. Ce constat est devenu évident il y a une dizaine d'années, et je n'ai eu de cesse depuis de vouloir rattraper ce déficit de publications et de recouvrer une meilleure assise entre les deux facettes de notre métier d'enseignant-chercheur. Cette décennie vient donc d'être consacrée au rééquilibrage entre mes activités de recherche et d'enseignement, sans pour autant réussir à réduire beaucoup ces dernières.

Ce mémoire est organisé en deux parties.

La première, d'une cinquantaine de pages et intitulée 'notice d'activités', résume mes activités scientifiques, pédagogiques et administratives. Nombreux sont les travaux cités dans cette partie et qui ne font pas l'objet de développements. En effet, j'ai encadré un grand nombre de projets conduits pour une large part en partenariat avec des entreprises industrielles ou des organismes. Donner une description résumée de chacun d'eux conduirait à une augmentation considérable, non forcément nécessaire, du nombre de pages de ce mémoire. Par ailleurs, j'ai donné une description minimale du contenu de mes enseignements, mettant en évidence les points clefs des connaissances dispensées, et préférant laisser plus de place aux aspects scientifiques de mes travaux de recherche.

La deuxième partie focalise justement sur ces aspects. Intitulée 'synthèse scientifique' et représentant les trois quarts du document final, j'y développe le parcours intellectuel qui m'amène aujourd'hui à introduire le concept d'isoarchie pour le pilotage des systèmes de production.

Dans un environnement international extrêmement concurrentiel, piloter avec efficacité son Système de Production est un point fondamental pour une entreprise. Les méthodes traditionnelles de gestion et de pilotage montrent toutes leurs limites respectives face à l'inflation des contraintes de production, et il devient incontournable d'explorer de nouvelles approches de pilotage, plutôt en rupture avec les approches généralement utilisées à l'heure actuelle pour effectuer les prises de décision.

Après un rapide bilan sur mes activités de recherche conduites jusqu'à ces dernières années, je propose un état de l'art aussi complet que possible sur les travaux conduits au sein de la communauté scientifique internationale IMS (Intelligent Manufacturing System) à propos du paradigme holonique. Ce dernier offre un cadre conceptuel au sein duquel ont été proposées diverses solutions, selon des approches combinant à des degrés divers hiérarchisation et distribution de la prise de décision.

Au delà du travail de ces équipes, nous proposons pour le pilotage des systèmes de production une architecture ne présentant plus aucune dimension hiérarchique dans la prise de décision. Pour cela, le concept d'isoarchie résulte du parti pris de pousser à ses limites ce raisonnement. Je présente donc ensuite notre vision de la prise isoarchique de décision dans le contexte d'un ensemble d'entités holoniques en interaction, ainsi que les modèles associés.

Différentes applications montrant différents aspects des performances obtenues et de la mise en œuvre de tels systèmes sont détaillées.

Cette proposition ouvre bien entendu de nombreuses perspectives dont une partie est développée à la suite... et préfigure la continuité de ma carrière d'enseignant – chercheur.

En annexe à ce mémoire se trouve également cinq tirés à part de communications représentatives de mes travaux.

NOTICE D'ACTIVITES

TABLE DES MATIÈRES

1.	Curriculum Vitae.....	9
1.1.	Etat Civil.....	9
1.2.	Situation professionnelle	9
1.3.	Titres et diplômes universitaires	9
1.4.	Déroulement de carrière.....	10
2.	Activités de Recherche	11
2.1.	Positionnement et objectifs scientifiques.....	12
2.2.	Thème 1 : Pilotage des systèmes robotiques et mécatroniques	14
2.3.	Thème 2 : Pilotage des systèmes manufacturiers mécatroniques	16
2.4.	Thème 3 : Pilotage tactique des systèmes logistiques	19
2.5.	Thème 4 : Approche holonique du Pilotage auto-organisé.....	21
2.6.	Autres approches ou problématiques	22
3.	Encadrement de travaux de recherche	24
3.1.	Direction de Thèses de Doctorat	24
3.2.	Participation à des travaux de Doctorat	24
3.3.	Direction de Master Recherche et de DEA	25
3.4.	Encadrement de projets et stages divers (Ingénieurs, Master, DESS)	26
4.	Administration et Animation de la Recherche.....	28
4.1.	Animation de la Recherche.....	28
4.2.	Organisation de manifestations	28
4.3.	Collaborations hors LSIS	28
4.4.	Appartenance à des sociétés et des groupes de recherche.....	29
4.5.	Fonction d'édition	30
4.6.	Participation à des Jurys de Thèse.....	31
4.7.	Evaluation de la recherche.....	32
4.8.	Participation aux instances locales et nationales d'évaluation	33
5.	Contrats, Projets et Transfert.....	34
5.1.	Contrats de recherche industriels	34
5.2.	Projets de recherche.....	34
5.3.	Actions de transfert industriel.....	35

6.	Diffusion scientifiques des travaux	37
6.1.	Publications dans des revues internationales avec comité de lecture.....	37
6.2.	Publications dans des revues nationales avec comité de lecture.....	38
6.3.	Editoriaux dans des revues internationales.....	38
6.4.	Chapitres dans des ouvrages collectifs avec comité de lecture	38
6.5.	Communications dans des congrès et colloques internationaux avec comité de lecture et actes	39
6.6.	Communications dans des congrès internationaux sans actes.....	42
6.7.	Communications dans des congrès nationaux avec comité de lecture et actes.....	42
6.8.	Rapports de contrats.....	42
6.9.	Mémoires.....	43
6.10.	Communications dans des colloques et journées nationales sans actes ...	43
6.11.	Soumissions en cours dans des revues internationales	44
7.	Activités d'Enseignement.....	45
7.1.	Description des Enseignements à Polytech'Marseille	45
7.2.	Description des Enseignements hors Polytech'Marseille	47
7.3.	Encadrements pédagogiques.....	48
8.	Administration et organisation des activités pédagogiques	50
8.1.	Responsabilités diverses à GII	50
8.2.	Chargé de mission 'Relations avec les Entreprises' à Polytech'Marseille.....	51
8.3.	Responsabilité des Activités Alternatives à l'IUSPIM	52
8.4.	Participation au Projet GEM (Global Education in Manufacturing)	52
8.5.	Responsabilité du Projet P ³ (Plateforme Polyvalente de Production)	53
9.	Synthèse des Activités.....	55

1. CURRICULUM VITAE

1.1. Etat Civil

PUJO Patrick

Né le 28 mai 1962 à Brest (Finistère)
Marié, 3 enfants nés en 1991, 1994 & 2003.
Nationalité Française



Adresse Professionnelle :
Polytech'Marseille
Département Génie Industriel et Informatique
Domaine Universitaire de St Jérôme,
Avenue Escadrille Normandie Niémen
13397 Marseille Cedex 20
Téléphone professionnel : +33 (0)4 91 05 60 55

Adresse personnelle :
10, traverse de la Source
La Calade
13015 Marseille
Téléphone personnel : +33 (0)6 10 82 21 34

Adresses électroniques :
patrick.pujo@lsis.org ;
patrick.pujo@polytech.univ-mrs.fr ;
patrick.pujo@icstar.fr

1.2. Situation professionnelle

Grade : Maître de Conférences Hors Classe, 5ème échelon
Section : 61ème section CNU (Génie informatique, Automatique, Traitement du signal)
Emploi : N°293 MCF 0644 à l'Université Paul Cézanne d'Aix-Marseille III
Mis à la disposition de l'École Polytechnique Universitaire de Marseille (Université de Provence)
Enseignant au département Génie Industriel et Informatique de l'École Polytechnique Universitaire de Marseille (GII - Polytech'Marseille)
Chercheur au Laboratoire des Sciences de l'Information et des Systèmes (LSIS - UMR CNRS 6168)

1.3. Titres et diplômes universitaires

1994 : Doctorat en Sciences de l'Université d'Aix-Marseille III (Spécialité : Automatique et Informatique)
«Contribution à la définition d'une modélisation technologique des robots industriels»
16 novembre 1994

1988 : Diplôme d'Études Approfondies XIAO (Université d'Aix-Marseille III)
1985 : Agrégation de Génie Mécanique (13°/55) (ENS de Cachan)
1984 : CAPET de Génie Mécanique (5°/33) (ENS de Cachan)
1984 : Maîtrise de Technologie de la Construction Mécanique (Université Paris VI)
1983 : Licence de Technologie de la Construction Mécanique (Université Paris VI)
1979 : Baccalauréat E (Lycée Rouvière, Toulon)
1978 : Baccalauréat F1 (Lycée Rouvière, Toulon)

1.4. Déroulement de carrière

2007 - : Maître de Conférences Hors Classe à Polytech'Marseille, Département de Génie Industriel et Informatique.

2001 - 2007 : Maître de Conférences (CN) à Polytech'Marseille (Université de Provence), Département de Génie Industriel et Informatique.

1995 - 2001: Maître de Conférences (1^{ère} Cl.) à l'Institut Universitaire des Sciences Pour l'Ingénieur de Marseille (IUSPIM, Université d'Aix-Marseille 3).

1991 - 1995: Professeur Agrégé à l'Institut Universitaire des Sciences Pour l'Ingénieur de Marseille (IUSPIM, Université d'Aix-Marseille 3).

Décembre 1988 - 1991: ATER à l'Institut Universitaire des Sciences Pour l'Ingénieur de Marseille (IUSPIM, Université d'Aix-Marseille 3).

4ème trimestre 1988 : Professeur Agrégé au Lycée Technique Fays de Villeurbanne (69).

1987 – 1988 : Stage pédagogique au CPR de Créteil, DEA à l'Université d'Aix-Marseille 3.

1986 - 1987 : Professeur stagiaire au Club Machine Outil de l'ENS de Cachan.

1985 – 1986 : Service national au 501^o RCC de Rambouillet.

1982 - 1985 : Élève Professeur en Génie Mécanique à l'ENS de Cachan (94).

2. ACTIVITÉS DE RECHERCHE

Cette partie présente une synthèse de mes activités de recherche, réalisées dans une succession de structures de recherche (cf. tableau 1). Ces activités ont toujours gravité autour de la notion de décentralisation des systèmes de pilotage, appliquée à différents niveaux de décision dans les systèmes manufacturiers. Avant d'aborder une présentation détaillée de ces activités, une description chronologique de ce parcours est nécessaire.

Période	Laboratoire
De 1987 à 1991	Laboratoire d'Automatique et d'Informatique de Marseille (LAIM)
De 1991 à 2001	Département de recherche en Informatique, en Automatique et en Mécatronique (DIAM-IUSPIM, UPRES-EA 2246)
De 2001 à 2007	Laboratoire des Sciences de l'Information et des Systèmes Équipe COSI (LSIS – UMR CNRS 6168)
2008	Laboratoire des Sciences de l'Information et des Systèmes Équipe SEDIP (LSIS – UMR CNRS 6168)
Depuis juin 2009	Laboratoire des Sciences de l'Information et des Systèmes Projet CODEP (LSIS – UMR CNRS 6168)

Tableau 1 : Laboratoires de recherche

Mes travaux de recherche ont débuté à mon arrivée en septembre 1987 au Laboratoire d'Automatique et d'Informatique de Marseille (LAIM). J'ai effectué mon DEA dans le groupe «Commande décentralisée», dirigée par le Professeur Daniel Brun Picard, sous la direction scientifique du Professeur Jean Claude Bertrand, Directeur du LAIM. En janvier 1991, le LAIM est devenu le Département de recherche en Informatique, en Automatique et en Mécatronique (DIAM UPRES-EA n°2210) de l'Institut Universitaire des Sciences Pour l'Ingénieur de Marseille, sous la direction du Professeur Eugène Chouraqui. Mes travaux se sont alors poursuivis dans l'équipe «Décentralisation de la Commande des Systèmes Mécatroniques», dirigée par le Professeur Jean Claude Bertrand, puis de 1997 à 1999 dans l'équipe «Systèmes de commande et de communication homme-machine décentralisés», toujours dirigée par le Professeur Jean Claude Bertrand. En 1999, à l'occasion de l'arrivée d'un certain nombre d'enseignants chercheurs dans le DIAM, nous avons rejoint l'équipe «Commande, Simulation et MODélisation des Systèmes (COSMOS)», avec le Professeur Norbert Giambiasi comme responsable d'équipe et toujours le Professeur Jean Claude Bertrand comme responsable scientifique de mes activités. Parmi les nouveaux arrivants, Fouzia Ounnar a été recrutée à l'IUSPIM en 2000 comme Maître de Conférences et mes travaux de recherche ont été marqués depuis par une collaboration scientifique étroite avec elle.

En janvier 2001, le Laboratoire des Sciences de l'Information et des Systèmes (LSIS – UMR CNRS 6168) a été créé. Dirigé par le Professeur Norbert Giambiasi et issu du regroupement d'équipes de recherche du DIAM, du Laboratoire d'Informatique de Marseille (LIM – FRE n°2246) et de l'Ecole Nationale des Arts et Métiers d'Aix-en-Provence (ENSAM), ce laboratoire fédère plus de cent chercheurs et doctorants provenant des trois Universités d'Aix-Marseille, de l'ENSAM, du CNRS et de l'Université de Toulon. Sa vocation est d'entreprendre des recherches fondamentales et théoriques en informatique et en automatique, recherches concernant plus particulièrement la Conception et l'Analyse des Systèmes Artificiels. Mes travaux de recherche se sont poursuivis dans l'équipe «COMmande et SIMulation (COSI)»

dirigée par le Professeur Claudia Frydman. Dans un premier temps, j'ai travaillé dans la continuité de mes activités précédentes, sur le thème «Organisation et Gestion Décentralisée des Systèmes à Événements Discrets», sous la direction du Professeur Jean Claude Bertrand. A l'arrêt des activités professionnelles de ce dernier, la thématique en question est apparue comme largement minoritaire et en décalage par rapport aux autres activités de l'équipe COSI. Il m'a fallu alors procéder à une réorientation thématique, ce qui m'a amené à conduire une réflexion de rapprochement des thématiques de recherche antérieures du tandem (Ounnar, Pujo) avec des problématiques de simulation à événements discrets. Ceci a débouché sur la mise en place d'un thème orienté productique, 'Modélisation et simulation de stratégies de pilotage auto organisé et/ou proactif', débutant en 2003 sous la responsabilité scientifique conjointe de Patrick Pujo et de Norbert Giambiasi.

Par ailleurs, le LSIS, après avoir mené une politique visant au renforcement de l'automatique continue, a lancé une action similaire pour l'automatique des SED et la Productique. Pour cela, un Professeur d'Université et un Directeur de Recherche CNRS ont intégré le LSIS en 2006. L'équipe SEDIP «Systèmes à Événements DIScrets, Productique», à laquelle je suis actuellement rattachée, a été reconnue en janvier 2008 par les instances scientifiques du laboratoire. Elle est dirigée par Jean-Claude Hennet.

2.1. Positionnement et objectifs scientifiques

Tout au long de mon parcours recherche, mes activités scientifiques ont gravité autour de la décentralisation de la commande et du pilotage de tâches automatisées, liées à des applications en Productique.

En rejoignant ma première équipe de recherche au LAIM, mes premiers travaux ont tout d'abord porté sur les couches inférieures de commande (celles qui concernent la gestion intrinsèque des machines et les asservissements d'axe), en liaison avec le thème général de l'équipe, qui portait sur les architectures décentralisées de commande automatique des systèmes industriels. Ces travaux se fondaient sur la proposition d'un modèle de coordination décentralisée des parties opératives d'une Machine de Production (M.O, Robot, ...) et sur le concept d'I-Machine, développé au laboratoire par le Professeur Jean-Claude Bertrand et Daniel Brun-Picard. Une I-Machine est une entité informative dotée d'une capacité d'action, de décision et de communication qui lui permet de mettre en action l'entité opérationnelle (le servomécanisme) à qui elle a été affectée tout en se coordonnant avec d'autres I-Machines. Ainsi l'ensemble du système de commande d'une machine de production peut-être modélisé par un réseau d'I-Machines auxquelles sont associés chacune des primitives opérationnelles de la machine. Il en résulte pour toute Machine de Production industrielle, une organisation en réseau d'acteurs (actionneurs, articulations,...). Le postulat majeur de la décentralisation est que la disparition du niveau hiérarchique de coordination centrale entraîne une meilleure réactivité de chacun des acteurs du réseau, du fait de la mise en parallèle de leurs décisions. En effet, chaque acteur ayant directement accès aux objectifs globaux que la Machine de Production (robot ou Machine Outil) doit atteindre (par exemple la caractéristique de la trajectoire à réaliser), il pourra mieux régler son objectif local, en tenant compte directement de ses propres contraintes.

Mes travaux ont donc été orientés initialement vers le contrôle commande de machines de production (machines outils à commande numérique et robots industriels).

Très rapidement, lors de l'intégration du LAIM à l'IUSPIM (devenu ainsi le 'Département de recherche en Informatique, en Automatique et en Mécatronique' (DIAM)), mon équipe s'est orientée vers la mise en œuvre de ces techniques de commande décentralisée à des systèmes mécatroniques.

En première approche, la mécatronique est intuitivement vue comme l'association de la mécanique et de l'électronique. En fait, la mécatronique n'est pas qu'une nouvelle forme de l'automatisation des systèmes mécaniques ou qu'une évolution de la robotique. La mécatronique permet l'amélioration des performances des systèmes 'mécatronisés', résultant de la combinaison synergique des génies mécanique, électrique et informatique dans la conception de produits et de systèmes. Nous qualifions de mécatronique un composant qui, outre sa capacité opérationnelle, possède suffisamment d'intelligence pour maîtriser par lui-même son propre fonctionnement, et au besoin pour intégrer ce fonctionnement en combinaison avec celui d'autres composants similaires. A cette condition, l'association mécanique et électronique a plus qu'un intérêt technologique et industriel : elle constitue un champ d'action pour la recherche de méthodes et d'outils pour la conception de Systèmes Mécatroniques de Production.

Un produit mécatronique résulte de la fusion de technologies {mécanique, électronique, automatique, informatique} et des savoirs associés, afin d'accroître son autonomie, son efficacité et sa convivialité.

Un système mécatronique peut être défini comme une société d'opérateurs mécatroniques reliés entre eux par des fonctions communes de coordination, de coopération et/ou de génération de tâches, et par une même fonction globale, chaque opérateur répondant par ailleurs à la définition d'un produit mécatronique. La décentralisation est alors le moyen de faire fonctionner ensemble un ensemble d'opérateurs mécatroniques ayant une fonction globale dans un système devenu ainsi lui-même mécatronique. En effet, nous constatons que la plupart des SAP, après analyse de leur constitution et de leur fonction de production, et ceci quelle que soit leur taille ou leur échelle, peuvent être abordés comme une société d'opérateurs mécatroniques. Nous avons choisi comme objectif de recherche l'augmentation de l'efficacité des SAP, au travers d'une approche 'système mécatronique', avec 2 axes applicatifs qui nous permettent de mettre l'accent sur l'aspect récursif de notre démarche. Ces deux axes, développés dans les 2 prochains paragraphes, concernent :

- l'architecture mécatronique des Machines de Production,
- l'architecture mécatronique des Systèmes de Production.

Le premier axe s'inscrit totalement dans la continuité des travaux antérieurs du LAIM sur la commande décentralisée. A ce niveau, les opérateurs mécatroniques sont des Opérateurs de Mouvement que nous retrouvons au niveau de chaque axe ou articulation de la machine. Mes contributions concernent plus particulièrement les problèmes de calibration de machine, la recherche de meilleures performances au niveau de la métrologie des trajectoires et l'analyse des implications réciproques qu'entraînent les améliorations possibles en termes de mécanique et de commande.

Pour le second axe de recherche, les opérateurs mécatroniques sont des Machines de Production. Il s'est agi de développer des concepts similaires à un niveau de décision supérieur, celui du pilotage décentralisé des systèmes de production automatisés flexibles (ou d'un atelier fortement automatisé), avec des entités opérationnelles plus compliquées (des Machines Outils intelligentes et autonomes) et des fonctions communes de coordination, de coopération et/ou de génération de tâches de nature différentes, proches de l'ordonnancement d'atelier.

Lors de l'insertion du DIAM dans le LSIS, cette thématique de recherche autour de la mécatronique a été interrompue. Nos travaux se sont alors recentrés sur le besoin de formalisation de nos approches du pilotage décentralisé. Nous avons cherché à mieux positionner nos travaux par rapport à des travaux allant dans le même sens et nous avons travaillé à mieux modéliser le comportement de nos entités de pilotage en utilisant les outils et méthodes de l'Automatique des Systèmes à Événements Discrets. Parallèlement, j'ai développé une collaboration avec un collègue pour formaliser et valider des concepts similaires au niveau supérieur du pilotage auto organisé de réseaux logistiques inter ateliers ou inter entreprises, renforçant ainsi l'aspect récursif de notre recherche.

Je vais donc présenter dans ce chapitre successivement et succinctement ces quatre thèmes, en respectant les chronologies respectives de mes contributions, en expliquant les diverses réorientations thématiques et leur impact sur la continuité de mes travaux, et en rappelant la diffusion associée à ces travaux, selon les références du paragraphe 6.

La conduite de tous ces travaux m'a permis de construire un modèle que je décrirais brièvement ici comme l'aboutissement de mes réflexions et qui sera largement développé dans la seconde partie de ce mémoire.

Enfin, je présenterais également, pour mémoire, quelques actions de recherche menées en parallèle et qui ont débouché sur des résultats intéressants et une diffusion scientifique en conséquence.

2.2. Thème 1 : Pilotage des systèmes robotiques et mécatroniques

Le thème de mon DEA a porté sur la Programmation Graphique de tâches de tournage. Ce système de programmation était destiné à être intégré au contrôle commande d'un tour CN à architecture de commande décentralisée. Utilisant ma culture 'Génie Mécanique', mon rôle a été de spécifier l'interface de programmation en fonction de considérations ergonomiques et de contraintes venant d'une approche 'méthode' de cette fonction. Parallèlement, j'ai établi les différents modèles permettant de décrire de manière décentralisée une trajectoire d'outils, en prenant en compte les caractéristiques géométriques, cinématiques et dynamiques des trajectoires élémentaires, avec les contraintes de synchronisation et de coordination.

A début de mes travaux de Doctorat, j'ai continué sur cette direction, en travaillant plus particulièrement sur la génération automatique de trajectoires en tournage. Pour cela, je me suis appuyé sur des connaissances développées au LURPA et acquises durant ma scolarité à l'ENS de Cachan. J'ai dû effectuer un travail de formalisation de ces connaissances pour pouvoir les implémenter.

J'ai ensuite commencé à m'intéresser aux problèmes posés par les interactions entre plusieurs machines (par exemple, comment 2 robots peuvent manipuler le même objet) et sur leur impact sur une structure décentralisée de contrôle – commande – pilotage multi machines [CN01].

Je suis revenu à la thématique mono machine en 1992 au travers d'un problème d'inexactitude de trajectoires constatée sur les robots industriels. Les collègues cherchaient à obtenir des lois de mouvement les plus précises possibles alors que les structures mécaniques des robots étaient d'une classe de précision moindre et que les modèles de commande étaient approximativement calibrés. J'ai alors analysé l'influence des défauts d'origine mécanique dans le comportement des robots industriels. J'ai alors conduit une démarche scientifique qui a débouché sur un premier papier, à Métrologie93 [CN02], sur le comportement effectif d'un robot industriel en fonction de sa charge. Constatant que cette thématique relevait bien du champ de recherche de l'équipe «décentralisation de la commande des systèmes mécatroniques», nous avons alors décidé d'en faire le thème de ma thèse : 'Contribution à la définition d'une modélisation technologique des robots industriels', soutenue le 16 novembre 1994.

Mon mémoire traite donc du problème de la modélisation technologique des robots. Nous appelons modélisation technologique un modèle comportemental de robot capable d'intégrer les imperfections des composants technologiques de ces robots industriels, lesquelles engendrent des erreurs dépendant ou non de leurs conditions d'utilisation. Cela se traduit par un écart entre la trajectoire réellement suivie par l'effecteur du robot et la trajectoire théorique que l'opérateur a défini par programmation pour exécuter une tâche de production donnée. La méthode proposée prend en compte les défauts et tolérances de fabrication, ainsi que l'élasticité de la transmission et des segments, et permet d'améliorer leur précision statique. Ce thème important en robotique est souvent assimilé à un problème d'étalonnage de robots, il

est en particulier essentiel pour la programmation hors ligne des robots et lors du changement d'un robot sur le site de travail.

Mon mémoire de thèse est organisé en trois chapitres.

Le premier chapitre présente un état de l'art sur la problématique de l'étalonnage de robots. Pour améliorer la précision du positionnement de l'effecteur du robot, nous proposons tout d'abord de comprendre les phénomènes à l'origine de ces écarts de trajectoire. L'accent est mis en particulier sur les sources des erreurs en précision rencontrées sur les robots, ainsi que sur les critères et les moyens de mesures utilisés pour évaluer les performances de robots industriels. Il met en évidence les insuffisances des modèles théoriques utilisés dans la commande de robots tels que les modèles géométriques direct et inverse... Le deuxième chapitre propose une modélisation technologique permettant la prise en compte de principales sources d'erreurs de précision d'un robot, d'origine géométrique et non géométrique, dans le cas pseudo statique (robot en position immobile ou se déplaçant à petite vitesse). La modélisation est fondée sur l'introduction d'un torseur de petits déplacements pour chaque corps afin de tenir compte des erreurs de paramètres géométriques et de déformations élastiques. Le chapitre trois est consacré à la présentation du logiciel "Robsilon", dont l'objectif principal est la simulation de robots en utilisant le modèle technologique. Une validation a été effectuée par expérimentation sur un robot PUMA 560, avec un jeu de paramètres simplifié.

L'ensemble de cette étude trouve son intérêt dans la perspective d'une architecture mécatronique de robot industriel : le robot mécatronique se définit par une structure mécanique plus allégée et donc plus souple, par une localisation au sein même des articulations des motorisations et de la commande décentralisée correspondante, cette dernière intégrant les traitements nécessaires pour compenser cette plus grande souplesse et recalibrer le robot en corrigeant les défauts liés au comportement technologique de ses composants [CI03].

Cette première étape s'est prolongée avec l'arrivée en 1995 de Bagher Asgari, doctorant dont j'ai piloté les travaux. Après avoir confirmé la validation de notre modèle à partir de la simulation d'un nouveau robot industriel, nous avons résolu le problème de la construction d'un tel modèle à partir de données métrologiques expérimentales, par identification de ses différents paramètres [CI07]. Les techniques d'identifications des phénomènes technologiques mettent en évidence l'influence de chaque paramètre sur la précision du robot. La simulation et l'expérimentation ont montré l'efficacité de cette approche, qui a été présentée à des constructeurs de robots industriels [JN02]. Ensuite, nous avons utilisé les fondements de ce modèle pour agir sur le système de commande et ainsi compenser dès l'origine et par anticipation ces différentes erreurs. Nous avons étudié ces mécanismes de correction dans le cadre de plusieurs architectures de commande, et nous avons particulièrement détaillé le cas d'un système de commande à architecture décentralisée, avec des boucles extéroceptives de prise en compte des caractéristiques de la tâche robotisée.

Cette expérience acquise, nous a permis de concrétiser une étude sur la commande décentralisée d'un robot à architecture mécatronique. Sur chaque axe contrôlé, un correcteur PID décentralisé dans l'Opérateur de Mouvement prend en compte les erreurs géométriques ou non dans l'élaboration de sa consigne, grâce à des fonctions intelligentes de correction de tous les micro-défauts d'origine technologique. Enfin, une simulation via Simulink et SDS présente l'aptitude de la commande décentralisée à fournir des consignes de mouvement correspondant à des trajectoires de précision.

Bagher Asgari a soutenu son travail le 28 octobre 1998.

Par la suite, les orientations stratégiques du laboratoire ont conduit notre équipe à se désengager des axes de recherche en mécatronique appliquée à la commande de machines de production industrielle.

2.3. Thème 2 : Pilotage des systèmes manufacturiers mécatroniques

Dès le début de mon insertion dans le monde de la recherche, mon désir était de mener des travaux autour des cellules flexibles de production. En parallèle des tâches qui m'étaient alors confiées, je me suis intéressé à l'application de la commande décentralisée à un système automatisé de type multi machine. Ces réflexions ont débouché sur une communication dans CIM'90 [CN01], mais n'a pas immédiatement donné lieu à une poursuite de ce premier travail : j'ai dû attendre 1995, avec l'arrivée en thèse de Nicolas Broissin, pour reprendre une activité sur ce thème de recherche.

Nous nous sommes alors efforcés de montrer que, dans le cadre de l'évolution des technologies mises en œuvre dans les systèmes de pilotage des Systèmes de Production Automatisés Flexibles (SPAF), il était possible d'augmenter l'autonomie et l'intégration de leurs différents constituants (Machine de Production - Mdp), de manière à augmenter la productivité globale du système de production. Ces constituants devenaient des acteurs du système, nous pouvions y concentrer de l'intelligence et de la capacité de décision ad hoc. Ceci nous a amené à proposer une approche mécatronique des systèmes de production, telle qu'elle a été décrite au paragraphe précédent. La méthodologie scientifique poursuivie consistait, en l'absence de modèles strictement formels et démontrables, à développer des solutions innovantes de pilotage décentralisé correspondant à des cas concrets et à les valider en pratiquant des expérimentations par simulation.

Les travaux concernant l'aspect multi machines ont donc porté sur différents types de SPAF, c'est-à-dire des systèmes de transformation manufacturière et des systèmes de transport et de stockage robotisés. (conception et simulation de systèmes de pilotage décentralisé pour Cellule de Fabrication Automatisée Flexible, pour Systèmes de Transport Robotisé et pour Systèmes de Stockage Robotisé). Dans ces applications, nous avons recherché et privilégié des systèmes fortement perturbés, composés d'opérateurs mécatroniques de nature hétérogène.

Les domaines théoriques abordés par cette recherche sont liés à l'Automatique, à l'Informatique, à la Mécanique et à la Productique. Différentes classes de modèles ont été utilisés, mais nous avons à l'époque principalement travaillé en utilisant le modèle des I_Machines et en l'enrichissant.

La récursivité du modèle de I-Machine nous a conduit à une représentation homogène unique des couches inférieures et supérieures de la commande d'une machine. Cette propriété permet en particulier d'associer les couches inférieures et supérieures de la commande à la recherche de la meilleure utilisation possible des ressources disponibles de la machine.

La démarche précédente conduit pour chaque Machine de Production à associer sa structure physique à une I-Machine pour constituer une entité opératoire autonome et intelligente : une Machine de Production devient un opérateur mécatronique de production. Dans ce contexte, il en résulte pour tout atelier de production une organisation en réseau d'opérateurs (M.O., robots, machines de transfert, machines spéciales...) autonomes.

Or, tout programme de production d'un atelier implique la coordination et l'ordonnancement des tâches de chaque Machine de Production qui le compose. Dans le contexte habituel d'une architecture non décentralisée, cette opération résulte de l'affectation, à travers la fonction d'ordonnancement, de tâches pré-générées, c'est à dire programmées hors ligne pour un type prédéfini de machine. Cette fonction, essentiellement prévisionnelle, génère sur un horizon temporel donné, un planning d'occupation des ressources en optimisant quelques critères globaux de productivité (maximisation du temps d'utilisation des ressources, minimisation des temps de transfert) et sous un ensemble de contraintes données (capacité des machines, ordre de précedence des tâches). Nombreux sont les travaux qui ont abordé cette problématique et nombreuses aussi sont les méthodes d'ordonnancement. Nous citerons à titre d'exemple les méthodes exactes, les méthodes par décomposition, les heuristiques, les règles de priorité et certaines

méthodes de simulation... Cette façon de procéder conduit nécessairement à une réactivité faible face aux variations de l'environnement ou du cahier des charges.

Le besoin de réactivité observé dans les ateliers conduit naturellement à la remise en cause des phases préparatoires à l'exécution du travail. L'ordonnancement temps réel, en réduisant l'horizon temporel, apporte actuellement un compromis intéressant entre optimisation globale de la production et réactivité. Trois grandes classes de méthodes d'ordonnancement temps réel se distinguent : les méthodes à bases de règles (priorités, heuristiques, relaxation des contraintes, planification avec marges confortables...), les méthodes d'aide à la décision (à base d'expertise, d'intelligence artificielle ou d'analyses diverses...) et les méthodes reportant les choix sur l'homme, en se focalisant sur l'augmentation de l'interactivité données / homme (chef d'atelier ou ingénieur d'ordonnancement). Toutes ces méthodes sont le plus souvent abordées dans un contexte de centralisation de la prise de décision : une seule vue du problème entraîne une prise de décision théoriquement plus cohérente.

Dans notre contexte décentralisé, nous nous sommes attachés à trouver des solutions pour palier cette dernière assertion, et montrer qu'il est possible d'avoir une évolution cohérente du Système de Production avec des prises de décision décentralisées.

Pour aller plus loin dans la remise en cause des phases préparatoires, nous avons également supprimé le recours à des programmes de tâche établis hors ligne, dans un bureau de préparation méthodes ignorant les futurs états réels des machines et équipements. Notre approche s'appuie alors sur le concept de 'connaissance métier', généralement traduit par les gammes de production et débouchant sur les programmes de tâche. Chaque machine va disposer d'une connaissance métier qui lui permet de générer en temps réel, la programmation de tâche la plus appropriée à son contexte.

Nous avons donc développé des solutions de pilotage des Systèmes de Production Automatisés Flexibles où la fonction ordonnancement est décentralisée et où elle se traduit par une affectation coopérative de tâches partiellement générées, c'est-à-dire programmées hors ligne par une description de haut niveau de la tâche de production, sans lien avec un type prédéfini de Machine de Production. Cette fonction décentralisée, qui n'est plus prévisionnelle mais au contraire temps réel, génère sur un horizon temporel donné minimal, un planning renégociable d'occupation des ressources en optimisant quelques critères locaux de productivité (maximisation du temps d'utilisation des ressources, productivité des Machines de Production) et sous un ensemble de contraintes données (capacité des machines, ordre de précedence des tâches). Ainsi, au lancement des Ordres de Fabrication (exécution de tâches globales à l'échelle du SPAF), rien n'est prévu, décidé, figé. Ceci nous a permis de remettre facilement en cause tout choix si la contingence de l'évolution des tâches, qu'elle soit due à un incident interne ou à un besoin instantané de flexibilité, l'imposait. La réactivité et donc la productivité s'en trouvent affectées : il s'agit d'accroître la réactivité d'un SPAF, qui est un indice de performance des plus économiquement intéressants actuellement.

Nous nous sommes focalisés sur des cas où les tâches de production sont définies à partir d'une connaissance 'métier' complexe (c'est à dire un savoir-faire spécifique au domaine, très élaboré et doté de modèles et de règles de décision). C'est là que les décisions à prendre sont les plus riches et peuvent engendrer un maximum de conséquences sur la productivité. C'est le cas des systèmes de transformation par usinage à commande numérique et des systèmes de transport robotisé, où de nombreux travaux ont permis de formaliser la connaissance 'métier' nécessaire.

L'originalité de cette approche est donc d'envisager le pilotage d'un SPAF en association avec une génération en temps réel des différentes tâches à exécuter. Pour cela, il a fallu d'une part décentraliser sur les Machines de Production elles-mêmes la génération des tâches de production non générées a priori, mais aussi d'autre part à mettre en place des mécanismes les laissant se répartir les différentes affectations de tâches, en s'appuyant uniquement sur l'évaluation de critères locaux. Cette approche abandonne

radicalement les logiques de hiérarchisation ou de centralisation. Elle a posé tous les grands principes de nos travaux ultérieurs.

Notre démarche a donc consisté à doter l'entité décentralisée (Machine de Production) de règles de génération de tâches, de décision et d'action qui lui permettaient d'évoluer de manière autonome dans un environnement hétérogène (les autres machines du SAP étant différentes) et en constante évolution (prévue ou non, dans le cas d'un événement perturbant).

Dans un tel contexte, le niveau de description et de programmation des tâches opérantes doit être élevé, (le programmeur décrit ce qu'il veut obtenir [niveau objet] et non pas comment cela doit être obtenu [niveau effecteur]) et l'intervention humaine doit pratiquement être supprimée pour la fonction d'ordonnancement du SAP (puisque ce sont les machines elles-mêmes qui vont s'organiser et s'affecter les tâches en ligne).

Cette logique de pilotage a pour corollaire de retarder au maximum les décisions liées aux choix d'affectation de tâches et ainsi de conserver toutes les occurrences d'affectation et de mise en œuvre des machines. Le résultat est qu'une perturbation sur le SPAF ne se rétro-propage plus jusqu'aux niveaux prévisionnels de pilotage, mais est directement prise en compte, en temps réel, par le système de pilotage lui-même, maximisant ainsi la réactivité.

Pour mieux décrire cette logique de pilotage, nous avons inclus deux notions supplémentaires dans le modèle des I-Machines (description des architectures de commande) : les notions de générations réflexe et réfléchie. D'une part, la génération réflexe engendre à partir d'une description du travail en termes d'objectifs technologiques synthétiques [niveau objet] une tâche décrite à un niveau interprétable par les sous-couches de la commande [niveau effecteur]. Nous avons choisi de nous appuyer sur des modèles déterministes (algorithmiques) de connaissances métier liées à la génération de tâche. Cette génération correspond par exemple à une génération de plans en robotique ou à la génération de phases d'usinage en fabrication. Par ailleurs, la génération réfléchie permet d'assurer l'affectation des tâches par la mise en concurrence des Machines de Production lorsqu'une nouvelle tâche doit être exécutée. C'est grâce à la génération réflexe qui estime quantitativement l'aptitude d'une Machine de Production à exécuter une tâche, que la génération réfléchie décide d'accepter ou de refuser la tâche. Le protocole de négociation que nous avons utilisé pour la mise en concurrence des Machines de Production relève de la famille des protocoles 'contract net', utilisés dans certains travaux sur les systèmes multi-agent. Ce protocole est bien adapté à notre contexte, puisqu'il est basé sur une évaluation locale des offres qui parviennent aux Machines de Production. Ainsi, en associant un appel d'offre à la description d'une tâche à réaliser, chaque Machine de Production peut participer à la négociation en s'auto-évaluant vis à vis de son propre potentiel de production. Cela lui permet de quantifier un critère local d'évaluation sur lequel repose la décision d'affectation collective et décentralisée de la tâche. Après avoir envisagé une décision d'affectation uniquement basée sur un coût d'exécution de la tâche, nous avons associé à ce premier critère d'autres critères basés sur des règles de priorités qui permettent de choisir un mode de production parmi différentes stratégies et ainsi de se rapprocher d'optima globaux. Plusieurs types de règles de production ont été envisagés comme par exemple SPT (plus court temps opératoire), FIFO ou encore EDD (plus proche délai). Ces différentes stratégies ont été testées face à différents types d'événements contingents.

Nicolas Broissin a soutenu sa thèse le 19 juillet 1999. Ces travaux et leurs suites ont donné lieu à plusieurs articles et communications dans des congrès et revues internationaux, tous relatifs aux différentes maquettes de simulation de systèmes de pilotage décentralisés qui ont été développées et qui sont opérationnelles :

- un simulateur d'une cellule de tournage (4 à 6 tours CN, 2 robots + diverses machines périphériques...) : [CI02, CI04, CI08, CI10],

- un simulateur de zone de stockage robotisée (N cases sur x étages, desservies par y robots mobiles et z ascenseurs) : [RC01, CI19, RI04],
- un simulateur de Hub de transbordement fer-fer : [CI11, CI12, RI01].

Ces travaux ont débouché sur le développement du concept d'auto organisation qui, associé au concept de décentralisation, permet de décrire complètement nos mécanismes de prise de décision hétérarchiques. Les travaux suivants ont alors gravité autour du thème de la structuration des prises de décision, en termes d'organisation de systèmes à événements discrets. Il s'est agi de définir, de développer, et d'évaluer des structures auto-organisées de prise et d'exécution de décision, supportées par des architectures décentralisées, l'objectif restant, en se passant d'entité décisionnelle de niveau hiérarchiquement supérieur, d'accroître la dynamique d'un Système à Événements Discrets face à une variation de sollicitation tout en conservant une forte robustesse de fonctionnement.

2.4. Thème 3 : Pilotage tactique des systèmes logistiques

Dans ce cadre, nous nous sommes intéressés avec Fouzia Ounnar au positionnement d'une réflexion autour du pilotage tactique de la relation Clients – Fournisseurs [CI13].

A ce niveau, un besoin de production exprimé par un client est vu comme une activité de production potentiellement réalisable sur divers systèmes de production concurrents ou coopérants, les fournisseurs, animés par un objectif commun : la rentabilité maximale de l'opération. Pour cela, nous devons améliorer la dynamique de la relation Clients / Fournisseurs, assurer la fiabilité des résultats escomptés (en termes de délais, de coûts...), considérer les contraintes technologiques diverses liées à la communication immatérielle (utilisation d'intranet, d'extranet...) et matérielle (transport, logistique, transitique...) entre les systèmes de production et enfin prendre en compte les contraintes économiques et de localisation. A partir de l'extension de travaux antérieurs, les points suivants ont été travaillés :

- l'affectation des ordres aux fournisseurs : modèle relevant de l'Automatique des SED (Réseaux de Petri Colorés) pour le protocole de négociation pour l'affectation décentralisée des ordres à chaque fournisseur par émergence du meilleur d'entre eux à cet instant...
- l'évaluation prévisionnelle de la prestation d'un fournisseur générique : prise en compte de sa capacité de production (cadence maximale - arrêts), de ses coûts (de fonctionnement & de logistique), de son plan de charge effectif, de son historique... selon un modèle d'aide multicritère à la décision (AHP).

Ces travaux nous ont permis d'illustrer à ce niveau de pilotage tactique notre principe d'auto organisation de systèmes de production constituant des réseaux de fournisseurs plus performants. En effet, la prise en compte en temps réel de l'aptitude de chaque fournisseur à répondre à un besoin d'un donneur d'ordre se fait au travers de l'analyse de la capacité de son système de production à traiter ces ordres de production. Suite à l'arrêt des activités de recherche d'un Maître de Conférences et le départ en congé pour reconversion thématique du Professeur Jean Claude Bertrand, notre thème de recherche rapidement eu un problème majeur de taille critique au sein de notre équipe de rattachement. Sans doctorants, ni financement, nous avons donc dû repositionner nos travaux vis-à-vis du reste de l'équipe, où personne d'autre ne travaillait en Productique.

Dans cette optique, nous avons analysé comment intégrer des activités liées à la simulation à événements discrets, quel pouvait en être l'apport pour l'amélioration du pilotage et quels devaient être les théories, méthodes et outils à maîtriser pour y parvenir. Le formalisme DEVS (Discret EVent Specification) étant un outil *ad hoc* pour valider par simulation le fonctionnement des Systèmes à Événements Discrets, nous avons décidé d'orienter nos actions de vérification - validation vers l'utilisation de ce formalisme. Ceci a débouché sur le démarrage d'un thème orienté Productique, intitulé 'Modélisation et simulation de

stratégies de pilotage auto organisé et/ou proactif, sous la coresponsabilité scientifique de moi-même et de Norbert Giambiasi. En d'autres termes, nous avons alors enrichi notre démarche habituelle de validation par l'expérimentation sur des maquettes de simulation par une validation théorique supplémentaire, via des modèles formels de simulation.

Une doctorante, Lynda Mekaouche, nous a rejoints en 2003, sur le thème du fonctionnement auto organisé de la chaîne logistique.

Nous avons proposé un modèle de pilotage auto organisé pour lequel le système de décision gère le fonctionnement d'un réseau d'entreprises faisant partie d'un partenariat. Cet ensemble d'entités (clients & fournisseurs) partenaires communiquent sur un même medium de communication (Internet ou Intranet) et négocient pour répondre au mieux aux attentes des clients et utiliser au mieux les capacités des fournisseurs. Pour cela, chaque fournisseur potentiel doit s'auto évaluer pour pouvoir participer à la négociation dans des conditions équitables et transparentes. L'entité proposant la meilleure performance pour un appel d'offre donné émerge du réseau d'entreprises en tant que fournisseur du besoin correspondant. Tout ceci correspond donc une automatisation des traitements de l'offre et de la demande afin d'optimiser les négociations et donner de l'autonomie aux entités faisant partie du réseau de partenaires. Pour pouvoir s'auto évaluer par rapport à une demande (un appel d'offre), nous avons proposé une évaluation multicritère de chaque fournisseur appartenant au partenariat. Cette évaluation de la performance des fournisseurs s'effectue suivant la méthode AHP «Analytic Hierarchy Process» pour un premier classement des appels d'offres au niveau d'un fournisseur, puis selon la méthode de Pondération Multicritère pour l'évaluation de la performance du fournisseur par rapport à l'appel d'offre classé premier par AHP. L'objectif du processus d'évaluation des fournisseurs est de choisir le fournisseur fiable qui livre des produits ou des services à faibles coûts en répondant aux exigences qualité du client. Ce processus d'évaluation vise à garantir que les fournisseurs avec qui l'entreprise opère sont fiables et satisfont les besoins dictés en termes de qualité, de quantité, et de délais de livraison etc.

En associant un centre de décision à chaque partenaire, cela lui permet de pouvoir s'auto évaluer face à la réception des appels d'offres et d'interagir avec les autres partenaires. Dans le but de formaliser cette proposition, nous avons modélisé ces centres de décision selon le formalisme DEVS. Nous avons, dans la suite de ce travail, simulé les modèles présentés et effectué une simulation globale qui a permis de déterminer les flux d'appels d'offre traités, négociés, refusés, etc... et d'évaluer leurs répartitions au niveau de tous les partenaires. Pour cela, nous avons intégré les modèles DEVS des centres de décision dans un environnement de simulation distribué HLA (High Level Architecture). Pour cela, ces modèles DEVS ont été rendus «HLA-compliant». A cet effet, nous avons défini les tables FOM (File Object Model) et les tables SOM (Simulation Object Model) ainsi qu'une hiérarchie de classes adéquates, en se basant sur les travaux réalisés par Zeigler concernant l'intégration de modèles DEVS dans une simulation HLA.

L'émergence du meilleur fournisseur a été simulée via un réseau de PC représentant un ensemble de clients et fournisseurs : les expérimentations conduites ont montré globalement comment un ensemble de tâches est enchaîné. Les comportements attendus des modèles ont pu être vérifiés et validés grâce à la simulation distribuée. Nous avons pu ainsi observer que notre approche d'affectation des commandes répondait bien à notre objectif d'obtenir un équilibre entre charge/capacité au niveau de chaque fournisseur et d'arriver à un lissage de charges entre les différents fournisseurs, avec comme objectif à plus long terme de proposer un système équitable entre les fournisseurs du partenariat.

Cette approche a largement été diffusée dans divers congrès et colloques [CI16, CI17, JN15-16, CI20-26, CI28-29, CI34] ainsi que dans différentes revues scientifiques internationales : IJLM [RI03] (les principes initiaux), PPC [RI06] (description des aspects multicritères), JIM [RI08] (mise en œuvre de la simulation distribuée des modèles DEVS via HLA) et IJLSM [RI09] (synthèse du cas d'étude).

2.5. Thème 4 : Approche holonique du Pilotage auto-organisé

Parallèlement aux travaux décrits au précédent paragraphe, et dans un souci de positionnement scientifique rigoureux de nos approches, nous avons effectué un travail de bibliographie important. Ceci nous a conduits à explorer le monde des systèmes multi-agents, puis le paradigme holonique. Dans ce dernier, la communauté IMS (Intelligent Manufacturing System) a amené des contributions majeures qui nous ont amenés à reconsidérer avec un regard plus affiné et des objectifs beaucoup plus ambitieux nos propres contributions. En effet, les principaux résultats obtenus dans le domaine des HMS (Holon Manufacturing System) montrent un certain consensus pour désigner un nombre restreint de types d'entités, les holons, dotés de capacités de traitement, de décision et donc d'intelligence. Portant des noms différents selon les écoles de pensées, nous trouvons les holons liés aux équipements (holon ressource, holon machine, holon poste...), les holons liés aux tâches à effectuer (holon ordre, holon tâche, holon job...), les holons liés au produit (holon produit) et les holons 'supplétifs' (holon staff, holon supervision, holon médiateur...) dont le rôle consistent à aider, voire au besoin à remplacer les autres holons pour leurs interactions. Un autre aspect extrêmement important dans l'approche holonique est l'effet Janus, qui introduit de fait la notion de récursivité que nous avons auparavant développé sur nos propres systèmes de pilotage de machines, de cellules et d'entreprises.

Nous avons plus particulièrement travaillé sur l'architecture holonique la plus connue, PROSA (Product, Resource, Order, Staff Architecture, du nom des 4 types de holons composants l'architecture du système de pilotage) (Van Brussel *et al.*, 1998). Nous y avons identifié similitudes et différences, points d'interrogations et sources d'enrichissement... Parmi tout cela, je citerai volontiers tout d'abord le fait que PROSA autorise différentes architectures hétérarchiques, dont une 'flat holonic form' qui correspond parfaitement à notre approche décentralisée et que nous ne rencontrons pas ailleurs. Ceci nous a renforcé concernant la spécificité de notre approche du pilotage, et nous avons par la suite développé le concept d'isoarchie pour qualifier au mieux notre approche architecturale. Ensuite, il apparaissait nettement que PROSA n'était pas vraiment adapté pour intégrer notre principe de génération réflexe (cf. §2.3), dans la mesure où le Holon Produit était confiné dans PROSA à un rôle de serveur de données. Par ailleurs, le Holon Staff n'avait plus aucun rôle à priori dans notre approche, dans la mesure où nous n'avons jamais observé de blocage, ni de situation de bouclage sans fin. Par contre, nous avons toujours essentiellement travaillé à doter de l'intelligence aux ressources, les autres types d'entités (produit et ordre) étant plutôt vue au travers de l'interaction avec leurs données. Doter produits et ordres d'intelligence, c'est-à-dire de capacité de décision et d'objectifs propres ouvrent de plus larges horizons.

Nous avons alors élargi notre spectre de préoccupations. En effet, nous nous étions intéressés jusque là qu'à des systèmes de production ayant des ressources pouvant être en concurrence, pour augmenter la productivité. Nous nous sommes alors intéressés à la mise en concurrence généralisée des holons, y compris des holons produits et des holons ordres. Nous avons alors étudié le cas d'un atelier fonctionnant en JobShop (en petites et moyennes séries renouvelables), pour mettre en place un système de pilotage à la fois décentralisé et auto-organisé qui permette aux différents holons en interaction d'exprimer leur point de vue lors de la prise de décision [CI31, CI33, CI35], avec un objectif global de gestion des opérations par un appel de flux par l'aval.

Ceci a eu comme conséquence une synthèse scientifique de tous nos travaux antérieurs, laquelle nous a amené à proposer le modèle d'architecture holonique PROSIS (pour Product, Resource, Order, Simulation Isoarchic Structure).

C'est cette synthèse qui sera détaillée dans la seconde partie de ce mémoire.

2.6. Autres approches ou problématiques

En marge de mes activités principales de recherche, j'ai eu l'occasion, lors de collaborations ou de transfert de compétences, de développer quelques idées, modèles et méthodes qui ont fait ensuite l'objet d'une diffusion scientifique.

Actions de recherche dans le domaine de la Conception des systèmes de production

Lors d'un projet en collaboration avec une entreprise, j'ai dû développer une méthode permettant de déménager une ligne de production sans en interrompre le fonctionnement. . Il s'agit d'anticiper les conséquences de l'arrêt programmé pour le déménagement d'une partie de la ligne pour en compenser les effets, en constituant un stock *ad hoc* permettant la continuation de l'activité productive. Le déménagement devient alors quasiment transparent pour la clientèle. Cette méthode était relativement originale, et elle a fait l'objet d'une première vague de diffusion entre 1999 et 2002 [CI09, CN03, RN01]. Ultérieurement, nous nous sommes appuyés à nouveau sur cette étude pour apprendre à manipuler le formalisme DEVS. Nous avons obtenu alors des résultats intéressants du point de vue de la modélisation d'une telle méthode, en particulier pour l'aide au dimensionnement nécessaire pour sa mise en œuvre : un modèle formel permet de quantifier précisément les paramètres du modèle en fonction du cas d'application. Nous avons alors diffusé cette approche auprès de la communauté CSP française [JN13] et de la communauté internationale, avec une présentation dans un congrès de simulation [CI19] et une publication dans la revue SIMPAT [RI05].

Actions de recherche dans le domaine du Management de la Qualité

Dans le domaine du management de la Qualité, j'avais déjà eu une collaboration avec Jean Paul Kieffer et l'un de ses doctorants, Dadan Daihani qui s'était conclue par une communication dans ICQ'93 [CI01]. Nous avons développé l'idée que la notion commune aux activités de production, de qualité et de maintenance était la notion de tâche, et qu'une gestion intégrée des tâches de toutes natures était nécessaire pour le bon fonctionnement des systèmes manufacturiers.

Lors de la rédaction du chapitre 'Pilotage par la Qualité' [OC02], j'ai noué de nouveaux liens scientifiques avec Maurice Pillet, du LISTIC (Annecy).

Nous avons analysé les influences successives sur le pilotage qu'ont eues la maîtrise statistique des procédés, la mise sous assurance qualité et la recherche continue de l'amélioration, et cela dans une optique continue de développement de la performance. Nous avons également proposé un modèle de lecture de la norme ISO 9001:2000, permettant de situer les différents points abordés dans la norme vis-à-vis d'une approche processus généralisée et en distinguant les niveaux stratégique, tactique et opérationnel.

Ceci a débouché sur une communication à Qualita'03 [CI14] et une publication dans IJQA [RI02].

Actions de recherche dans le domaine du Management des Projets de Recherche Partenariale

Fort de mon expérience dans le domaine de la Qualité et de la gestion de projets, j'ai été amené en 2006 à collaborer au montage du projet d'un Institut Carnot à Marseille. Une huitaine de laboratoires marseillais, 7 UMR issus de l'Université Paul Cézanne, de l'Université de Provence et 1 UPR du CNRS, se sont associés pour répondre à l'appel à candidature relatif au Label Carnot. Le LSIS est l'un de ces laboratoires. Ainsi, j'ai contribué, avec les Directeurs de ces unités de recherche et les représentants des tutelles, à la

définition de la gouvernance d'une telle structure, en mettant particulièrement en avant l'efficacité des relations partenariales entre les laboratoires et les partenaires du monde socio économique.

Ceci s'est traduit par la définition d'une organisation des organes de direction aux niveaux stratégique, tactique et opérationnel, puis par la définition d'une politique Qualité et du rôle d'une cellule Qualité chargée de la mise en place des outils et processus *ad hoc*.

Dans ce cadre, j'ai participé à une école d'été 'Qualité en Recherche' à La Grande Motte, en septembre 2006. J'ai ensuite pratiqué un audit de bonnes pratiques au sein des laboratoires composant la structure. J'ai proposé un mode de fonctionnement de la structure reprenant les recommandations des référentiels ISO 9001-2000 et FD X 50-551 et j'ai formalisé ce fonctionnement selon une approche processus. Le processus central de ce dispositif concerne les 4 phases successives du processus de conduite opérationnelle d'un projet de recherche partenariale.

Ces travaux ont été présentés devant les tutelles, devant différents responsables nationaux du Label Carnot, lors d'un audit devant des experts du cabinet Ernst & Young ainsi que lors d'un congrès international [CI30].

Depuis la labellisation en 2007, je continue à assurer le rôle de qualicien de l'Institut Carnot STAR.

Actuellement, je travaille à la spécification et à l'implémentation d'un e-outil de pilotage de projets de recherche, multi projets, multi utilisateurs, multi-sites, multi partenaires, et reprenant les différentes phases de l'approche processus précédemment spécifiée.

Cet outil d'e-management est en cours d'intégration finale sous forme d'un intranet couplé au site web de l'Institut Carnot STAR.

3. ENCADREMENT DE TRAVAUX DE RECHERCHE

3.1. Direction de Thèses de Doctorat

Thamer Louati : *‘Contribution à l'étude et à la réalisation d'un contrôle isoarchique d'un flux de personnes via un réseau de capteurs biométriques*, Thèse de Doctorat en Sciences, Université Paul Cézanne d'Aix-Marseille III, LSIS, Marseille, 1^{ère} inscription en 2009, Contrat CIFRE, (Codirection avec Charles Santoni).

Yves Dubromelle : *‘Pilotage holonique et ambiant via des technologies infotroniques*, Thèse de Doctorat en Sciences, Université Paul Cézanne d'Aix-Marseille III, LSIS, Marseille, 1^{ère} inscription en 2009 (Codirection avec Jean-Claude Hennet)

Karen Ohayon : *‘Aide à la décision multicritère pour l'ordonnancement temps réel d'atelier & Amélioration automatique de la cohérence d'AHP*, Thèse de Doctorat en Sciences, Université Paul Cézanne d'Aix-Marseille III, LSIS, Marseille, 1^{ère} inscription en 2008, (Avec la participation de Fouzia Ounnar).

Nicolas Broissin : *‘Contribution à l'amélioration de la réactivité des Systèmes de Production Automatisés Flexibles grâce à un pilotage basé sur une génération de Tâches décentralisée*, Thèse de Doctorat en Sciences, Université d'Aix-Marseille III, DIAM, Marseille, le 19 juillet 1999, (Co-encadrement avec Jean Claude Bertrand).

Jury : Jean Claude Bertrand (Directeur, Président), Alain Bourjault (Rapporteur), Alain Jutard (Rapporteur), Jean-Paul Kieffer (Examineur), Pierre Padilla (Examineur) et Patrick Pujo (Co Directeur).

Nicolas Broissin est actuellement Chef de Projet R&D à 'La Française des Jeux'.

Bagher Asgari : *‘Contribution à la prise en compte du comportement multi-technologique des robots industriels dans le contexte d'une architecture de commande décentralisée*, Thèse de Doctorat en Sciences, Université d'Aix-Marseille III, DIAM, Marseille, le 28 octobre 1998 (Co-encadrement avec Jean Claude Bertrand).

Jury : Jean Claude Bertrand (Co Directeur, Président), Alain Bourjault (Rapporteur), Jean-François Lemaître (Examineur), Pierre Padilla (Rapporteur) et Patrick Pujo (Co Directeur).

Bagher Asgari est actuellement enseignant chercheur en Iran.

3.2. Participation à des travaux de Doctorat

Lynda Mekaouche : *‘Pilotage holonique auto-organisé de réseaux logistiques : validation par modélisation et simulation distribuée*, Thèse de Doctorat en Sciences, Université Paul Cézanne d'Aix-Marseille III, LSIS, Marseille, le 22 juin 2007.

Jury : Claudia Frydman (Examineur), Norbert Giambiasi (Directeur), Bernard Grabot (Rapporteur), Pierre Ladet (Président), Gérard Morel (Rapporteur) et Fouzia Ounnar (Co Directeur).

Lynda Mekaouche est actuellement Ingénieur R&D dans une SSII.

Participation aux travaux et à toutes les publications de la doctorante.

3.3. Direction de Master Recherche et de DEA

- [MR07] : **Selma, Kheder** " *Évaluation de la performance d'un système de pilotage isoarchique et multicritère* ", MR'SIS, LSIS 2010.
- [MR06] : **Memya Cherif**, " *Étude et analyse de la gestion intégrée de processus décisionnel ; application pour le déploiement de workflows pour la recherche partenariale à l'Institut Carnot STAR* ", MR'SIS, LSIS 2010.
- [MR05] : **Yves Dubromelle**, " *Étude des interactions inter-holoniques dans le système de pilotage HAIMES*", MR'SIS, LSIS juin 2009.
- [MR04] : **Fabien Depoyant**, " *Contribution au développement d'un HMES (Holonc Manufacturing Execution System)*", MR'SIS, LSIS juillet 2007
- [MR03] : **Mayssa Zammouri**, " *Contribution à l'analyse, la modélisation et la simulation d'un mode de pilotage en flux tiré pour des lignes de production en petites séries renouvelables* ", MR'SIS, LSIS juillet 2006
- [MR02] : **Romain Bouniol**, " *Contribution à la modélisation DEVS de postes de travail en vue d'un pilotage proactif par simulation*", MR'SIS, LSIS Juillet 2005
- [MR01] : **Salah Ziani**, " *Formalisme interne d'une entité de pilotage auto organisée, étude du module de simulation*", MR'SIS, LSIS Juillet 2004
- [DEA16] : **Virgile Ricciardi**, " *Contribution à l'étude de primitives d'assistance au pilotage par la simulation dans un MES*", DEA MCAO, LSIS Juillet 2003
- [DEA15] : **Hendro Wijoyo**, " *Contribution à l'identification et à la modélisation d'invariant fonctionnels d'un système de pilotage décentralisé*", DEA MCAO, LSIS Juillet 2002
- [DEA14] : **Karen Ohayon**, " *Étude et modélisation des interruptions d'un flowshop grâce à l'algèbre des diodes*", DEA MCAO, LSIS Juillet 2002
- [DEA13] : **Régis Bursis**, " *Contribution au développement du protocole d'interaction par génération réfléchie*", DEA MCAO, LSIS Juillet 2002
- [DEA12] : **Jean Philippe Charbonné**, " *Étude et réalisation du pilotage décentralisé d'un parc de stationnement robotisé*", DEA MCAO, LSIS Septembre 2001
- [DEA11] : **Kamel Berrouba**, " *Modélisation et performance des robots industriels*", DEA MCAO, DIAM Septembre 2000
- [DEA10] : **David Bellemare**, " *Contribution à l'étude du système de pilotage décentralisé d'un système de transport robotisé*", DEA MCAO, DIAM Septembre 2000
- [DEA09] : **Jean Peyrot**, " *Contribution à l'établissement d'une méthode pour le déménagement d'un flowshop sans interrompre la production*", DEA MCAO, DIAM Septembre 1998
- [DEA08] : **Laurent Druel**, " *Contribution à la réalisation de l'identification des paramètres technologiques d'un robot industriel et de l'application à l'évaluation des performances d'un robot mécatronique*", DEA MCAO, DIAM Septembre 1996
- [DEA07] : **Arnaud Chevet**, " *Contribution à l'étude des primitives de génération réflexe d'un robot mobile dans un Système Robotisé de Transitique*", DEA MCAO, DIAM Septembre 1995
- [DEA06] : **Bao N'Guyen**, " *Contribution à l'identification d'un modèle paramétrique du comportement technologique des robots industriels*", DEA XIAO, DIAM Septembre 1995
- [DEA05] : **Nicolas Broissin**, " *Mise en œuvre des primitives de génération décentralisée de tâches de production*", DEA XIAO, DIAM Septembre 1994
- [DEA04] : **Gérard Massé**, " *Contribution à l'étude du comportement technologique des robots industriels poly-articulés*", DEA XIAO, DIAM Septembre 1994
- [DEA03] : **David Marsé**, " *Contribution à l'étude de la décentralisation de la génération des tâches opératives dans un système de production*", DEA XIAO, LAIM Juillet 1992

[DEA02] : **Patrick Renavot**, "*Contribution à l'étude et à la réalisation d'un système de supervision d'un tour industriel*", DEA XIAO, LAIM Juillet 1990

[DEA01] : **Daniel Yung**, "*Contribution à l'étude et à la réalisation d'un logiciel de programmation graphique d'un tour*", DEA XIAO, LAIM Juillet 1989

3.4. Encadrement de projets et stages divers (Ingénieurs, Master, DESS)

[ST19] : **Ceyda Olcan**, "*Mission d'assistance à chef de projet pour la mise en place opérationnelle d'une plateforme polyvalente de production*", Master Thesis, Master en Industrial Engineering, Technical University of Istanbul, Mars 10.

[ST18] : **Afef Denguir**, "*Développement d'une méta-heuristique pour l'optimisation d'une méthode d'aide à la décision multicritère*", Projet de fin d'études, Ingéniorat en Informatique, INSAT de Tunis, Décembre 09 (en collaboration avec Fouzia Ounnar).

[ST17] : **Selim Draoui**, "*Contribution au développement d'un groupware pour le management intégré de l'Institut Carnot STAR*", Projet de fin d'études, Ingéniorat en Informatique, INSAT de Tunis, Décembre 09.

[ST16] : **Mustapha El Mouchaouk**, "*Intégration du poste opérateur et du superviseur dans le système de pilotage HAIMES*", Stage de Valorisation Industrielle, Polytech'Marseille - GII, Juin 09.

[ST15] : **Selma Kheder**, "*Pilotage d'un Job Shop via une approche auto organisée, temps réel et multicritère : étude d'un cas industriel*", Projet de fin d'études, Ingéniorat en Génie Industriel, ENIT, Tunis, Juin 09 (en collaboration avec Fouzia Ounnar).

[ST14] : **Chaffion Atoumani**, "*Amélioration d'un e-progiciel pour le management de l'Institut Carnot STAR : étude d'un module de comptabilité et intégration du gestionnaire de contenu*", Stage de Valorisation Industrielle, Polytech'Marseille - GII, Juin 09.

[ST13] : **Memya Cherif**, "*Mission d'assistance à chef de projet via le e-management de l'Institut Carnot STAR*", Projet de fin d'études, Ingéniorat en Génie Industriel, ENIT, Tunis, Juin 09.

[ST12] : **Mohamed Hamani**, "*Migration du système de pilotage HIMES vers la simulation distribuée via HLA : mise en oeuvre d'un RTI (Run Time Infrastructure)*", Projet de fin d'études, Ingéniorat en Informatique, INSAT de Tunis, Décembre 08.

[ST11] : **Thamer Louati, Nabil Salem**, "*Mise en place d'un e-progiciel pour le management de l'Institut Carnot STAR*", Projet de fin d'études, Ingéniorat en Informatique, INSAT de Tunis, Décembre 08.

[ST10] : **Mohamed Limani, Samir Barkallah**, "*Conception et développement d'un portail intranet pour la gestion de projet et le management de la qualité dans une structure de valorisation de la recherche partenariale : l'Institut Carnot STAR*", Stage de fin d'études, Master Pro SIS, Université Paul Cézanne, Septembre 08.

[ST09] : **Andreea Elena Dude**, "*contribution to a distributed simulation platform for holonic manufacturing*", Internship in Computer Science, School of Automatic Control and Computer Science, Polytechnic University, Bucharest, Juin 2008.

[ST08] : **Ridha Tiliouine, Zakaria Hamrhi**, "*Développement d'une maquette de pilotage auto organisé pour une gare de triage robotisée, via HLA*", Projet de fin d'études, Ingéniorat en Informatique, Faculté des Sciences de Tunis, Université de Tunis, Juillet 2006.

[ST07] : **Mabrouk Ben Abdallah**, "*Développement d'une interface graphique pour une maquette de pilotage auto organisé pour un parking robotisé, via HLA*", Projet de fin d'études, Ingéniorat en Informatique, INSAT de Tunis, Juin 2006.

[ST06] : **Wassim Trojet**, "*Développement d'une maquette de pilotage auto organisé pour un parking robotisé, via HLA*", Projet de fin d'études, Ingéniorat en Informatique, Faculté des Sciences de Tunis, Université de Tunis, Juillet 2005.

- [ST05] : **Massimo Pedetti**, "*Contributo alla modellizzazione dei posti di lavoro per l'ottenimento di un sistema di pilotaggio proattivo basato sulla simulazione*", Mémoire d'ingénieur en mécanique, Faculté d'ingénierie mécanique, Université de Perugia, Juillet 2004
- [ST04] : **Mahnaz Shamchirzaz**, "*Modélisation géométrique et technologique d'un robot Hitachi PW10*", DESS MAQUASIR, Juillet 1998
- [ST03] : **Kamel Drouiche**, "*Étude d'un correcteur de trajectoires pour compenser les défauts technologiques d'un robot industriel*", DESS Automatique d'Angers, Juillet 1997
- [ST02] : **Norbert Varnieu**, "*Mise en œuvre d'un réseau de communication VAN avec adressage par groupes prédéfinis*", DESS ITCI, Marseille, Juillet 1995
- [ST01] : **Eric Pages**, "*Evaluation de performances d'un protocole sur un réseau VAN pour une commande décentralisée de robot industriel*", DESS ITCI, Marseille, Juillet 1995

4. ADMINISTRATION ET ANIMATION DE LA RECHERCHE

4.1. Animation de la Recherche

Co-animateur du groupe de travail "COMmande & PILOtage" (COMPIL) du GRP de 1998 à 2001, avec Pascal Lhoste, du CRAN (Nancy)

Les travaux du GT «COMPIL» ont eu pour objectif principal d'étudier, puis de faire évoluer, les architectures de commande et de pilotage des Systèmes de Production et leur ingénierie en tenant compte à la fois des besoins industriels, de l'offre technologique et des résultats de recherche dans ce domaine (résultats, travaux en cours, orientations, ...). Ces travaux ont contribué à la Modélisation des Systèmes de Production en proposant un ou des Modèles de Référence formalisant la connaissance acquise (l'état de l'art) en matière de Contrôle-Commande et de Pilotage. Ces objectifs ont été recherchés au travers d'un cadre de référence, composé de 3 axes dont nous développons les définitions dans la suite de ce paragraphe : un axe "Système", un axe "Architecture" et un axe "Abstraction".

Le GT COMPIL s'est réuni à Besançon en novembre 1998, à Marseille en mars 1999, à Nîmes en juin 1999, à Nancy en novembre 1999, à Annecy en mars 2000, à Valenciennes en octobre 2000 et enfin à Montpellier en mars 2001. A cette date, le GRP s'est restructuré en vue de préparer son insertion dans le GDR MACS, et il y a eu une réorganisation des thématiques de groupes où COMPIL a disparu. Sur un plan plus personnel, je me suis plus particulièrement impliqué dans les actions suivantes :

- Participation à l'organisation des journées de Marseille (Mars 1999)
- Organisateur des sessions OGP-COMPIL des journées d'Annecy (Mars 2000), en collaboration avec Damien Trentesaux (LAMIH).
- Organisateur de la session SPSF-COMPIL des journées de Valenciennes (Octobre 2000), en collaboration avec Eric Niel (LAI).
- Organisateur de la session OGP-COMPIL des journées de Valenciennes (Octobre 2000), en collaboration avec Damien Trentesaux (LAMIH).

Présidence de sessions dans MOSIM'08, CIGI2001, MOSIM'01, CIGI'95.

4.2. Organisation de manifestations

2004 : journées du pôle STP du GDR MACS

Coorganisateur des journées de synthèse d'Aix 2004 du pôle STP du GDR MACS (site ENSAM du LSIS, Aix-en-Provence, octobre 2004, 230 participants, 52 communications, 14 Groupes de Travail présents), responsable du programme scientifique et des relations avec les participants.

2004 : journée du projet GEM

Coorganisateur de la journée de présentation du projet GEM (ENSAM, Aix-en Provence, octobre 2004, 80 participants, 3 communications).

2007 : journée du projet SCP du GDR MACS

Coorganisateur de la journée du projet exploratoire SCP 'Systèmes Contrôlés par le Produit' du pôle STP du GDR MACS (Site Polytech'Marseille du LSIS, 21 octobre 2007, 20 participants, 8 présentations).

4.3. Collaborations hors LSIS

2008-2010, Selma Limam Mansar, Carnegie Mellon Univerty of Qatar, Doha, Qatar

2009, Hanen Bouchriha, ENIT, Tunis, Tunisie
2008-2010, Abderrazak Jemai, INSAT, Tunis, Tunisie
2008, Bernard Archimède, Philippe Charbonnaud, ENIT, Tarbes
2007-2009, Olivier Labarthe, Benoît Montreuil, CIRRELT, Québec, Canada
2004, Ingrid Hunt, CIMRU, Galway, Ireland
2004, Asbjorn Rolstadas, SINTEF, NUST, Trondheim, Norway
2003, Hanen Bouchriha, Sophie D'Amours, CIRRELT, Québec, Canada
2002-2003, Maurice Pillet, LISTIC, Annecy

4.4. Appartenance à des sociétés et des groupes de recherche

Participation à des sociétés savantes

Membre du Club EEA,
Membre du GRP (Groupement de Recherche en Productique) jusqu'à son intégration en 2001 au sein du GDR MACS.
Membre du comité scientifique du GRP de 1998 à 2001.
Membre du GDR MACS (Modélisation, Analyse et Conduite des Systèmes), pôle STP (Sciences et Techniques de Production de biens et de services),
Membre du comité de suivi du pôle STP du GDR MACS.
Membre du Mac Leod Institut of Simulation Sciences (Marseilles MISS),
Membre de SCS (Simulation Computational Society).

Participation à des actions scientifiques

Membre actif du projet structurant 'Systèmes Contrôles par le Produit'
Membre actif du GT OGP-Vendôme du GDR MACS, pôle STP,
Membre actif du GT CSP du GDR MACS, pôle STP,
Membre associé du GT Vendôme du GDR MACS, pôle STP,
Membre associé du GT ERP du GDR MACS, pôle STP.

Collaborations nationales

Participation à des projets de recherche : RTP 47: Production Coopérative Médiatisée (PCM) :
Coordonnateur : Jean-Paul Bourrières - LAP (Bordeaux)
Ce réseau s'intéresse aux activités de conception, production et distribution de biens et de services mises en œuvre par les systèmes de création de valeur à fort impact socio-économique.
Action Spécifique CNRS STIC n°35 : PRODUCTION et LOGistique dans l'entreprise étendue : modèles et outils collaboratifs (PRODLOG) : Contact : Jacques Erschler - LAAS (Toulouse)
L'action spécifique se situe dans le contexte des organisations productrices de biens et de services. Elle s'intéresse plus particulièrement à l'analyse, la conception et la réorganisation des activités de l'entreprise, à la conception de produits, à la gestion des flux et des opérations, à la commande et au pilotage d'équipements.
Action Spécifique CNRS STIC : VERSIM – Vers une théorie de la simulation : GDR I3

4.5. Fonction d'édition

Traité encyclopédique IC2

Coordination, avec Jean Paul Kieffer (LSIS - UMR CNRS 6168), de deux ouvrages collectifs sur le pilotage des systèmes de production dans la collection encyclopédique IC2 Productique (Hermès) (2002). Le premier de ces deux ouvrages, “ **Fondements du Pilotage des Systèmes de Production** ”, a pour objectif de présenter la diversité des approches du pilotage des systèmes industriels, qui s'exprime aussi bien par les structures des systèmes de décision mis en place que par les processus et procédures de décision, de rendre compte de la complexité des problématiques abordées et de livrer une «cartographie» raisonnée des divers concepts et vocabulaires associés manipulés par les spécialistes du domaine. Ainsi, la première partie traite les fonctions et les architectures possibles des systèmes de pilotage, ce qui permet de définir les principaux concepts du domaine et de les articuler les uns par rapport aux autres. Puis, dans la seconde partie, la mise en œuvre du pilotage au sein de la gestion d'atelier est examinée selon différents points de vue : processus de type «continu» ou «discontinu», notions de commande, de supervision, de MES...

16 auteurs ont collaboré dans ce premier ouvrage.

Le second ouvrage, “ **Méthodes du Pilotage des Systèmes de Production** ” vise à montrer l'évolution constatée dans ce domaine, tant par l'augmentation de la finesse des objectifs poursuivis que par la sophistication des systèmes informatiques qui supportent le pilotage ou encore par la variété des solutions mises en œuvre pour optimiser l'utilisation de ressources de production de plus en plus coûteuses. Ainsi, il laisse une large place aux résultats les plus récents de la recherche en automatique et en productique.

Deux axes ont été développés. Les méthodes de pilotage par approches temporelles supposent maintenant qu'il faut faire face à des événements aléatoires lors du pilotage en temps réel des installations manufacturières, et donc développent des capacités temps réel de réactivité, de flexibilité et d'agilité. D'autres approches prennent en compte d'autres aspects, notamment la management par la qualité, par les coûts ou par la recherche de la fluidité des flux...

17 auteurs ont collaboré dans ce second ouvrage.

Numéros spéciaux de revues scientifiques

- **Numéro spécial de JESA** (Journal Européen des Systèmes Automatisés) sur le thème : “ **Pilotage Distribué des Systèmes de Production** ”

Editeur invité avec Damien Trentesaux (LAMIH (UMR CNRS 8530), Valenciennes) :

L'organisation de ce numéro spécial a permis de faire le point sur les activités francophones de recherche sur ce thème, activités dont la diversité était apparue dans le cadre des travaux et activités des Groupes de Travail «COMmande et PILotage» (ComPil) et «Organisation et Gestion de la Production» (OGP) du Groupement de Recherche en Productique.

Numéro double paru en 2001 : Vol. 35, N°7-8.

- **Numéro spécial de JESA** (Journal Européen des Systèmes Automatisés) sur le thème : “ **Systèmes Contrôlés par le Produit** ”

Editeur invité avec André Thomas (CRAN (UMR CNRS 7039), Nancy) et Damien Trentesaux (LAMIH (UMR CNRS 8530), Valenciennes) :

La notion de «Système Contrôlé par le Produit» est un concept novateur dont l'étude exploratoire a été conduite lors d'un projet du GDR MACS. Ce numéro spécial présentera un panel de démarches top-down (le système comme objet auto-organisé constitué d'entités dotées de capacités décisionnelles) et

bottom-up (passage du produit physique passif au produit participant de façon active à son environnement).

Numéro double, avril 2009.

Editeur associé de JESA

2008-2010 : membre du comité de rédaction de JESA (Journal Européen des Systèmes Automatisés)

Le comité de rédaction de JESA (2 Rédacteurs en Chef et 14 Editeurs associés couvrant tous les champs scientifiques de l'Automatique) se fixe comme objectif de continuer à augmenter la notoriété de JESA, notamment en renforçant le travail de relecture, en référençant la revue dans les bases bibliographiques internationales et en déployant un portail pour la soumission et le suivi de l'évaluation des propositions de publications. Mon rôle est celui d'Editeur associé (L'un des 2 couvrant le champ de la Productique), avec comme mots clefs : Systèmes de production, Systèmes de pilotage, Systèmes holoniques et hétérarchiques, Organisation et gestion industrielle, Simulation à événements discrets.

4.6. Participation à des Jurys de Thèse

Outre les jurys de Thèse de mes 2 doctorants, j'ai également été invité à siéger dans différents jurys, dont 3 jurys de Thèse.

Pascal Blanc : *'Pilotage par approche holonique d'un système de production de vitres de sécurité feuilletées'*, Thèse de Doctorat en Sciences, École Centrale de Nantes et Université de Nantes, IRCCyN, Nantes, le 11 décembre 2006.

Jury : Pierre Castagna (Co Directeur), Isabel Demongodin (Co Directeur), Frank Fontanelli (Examineur), Gérard Morel (Rapporteur), Patrick Pujo (Examineur), Christian Tahon (Rapporteur, Président), et Paul Valckenaers (Rapporteur).

Salah Bousbia : *'Amélioration continue des performances des systèmes de production de biens et de services : proposition d'un système de pilotage hétérarchique évolutif par apprentissage'*, Thèse de Doctorat en Sciences, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, LAMIH, Valenciennes, le 12 décembre 2006.

Jury : Yannick Frein (Président), Alain Guinet (Rapporteur), Gérard Morel (Rapporteur), Patrick Pujo (Examineur), Christian Tahon (Directeur), Philippe Thomín (Examineur) et Damien Trentesaux (Co Directeur).

Olivier Cardin : *'Apport de la simulation en ligne dans l'aide à la décision pour le pilotage des systèmes de production – application à un système flexible de production'*, Thèse de Doctorat en Sciences, Université de Nantes, IRCCyN, Nantes, le 26 octobre 2007.

Jury : Pierre Castagna (Directeur), Frank Fontanelli (Examineur), Khalil Kouiss (Examineur), Jean-Jacques Loiseau (Président), Henri Pierreval (Rapporteur), Patrick Pujo (Examineur), André Thomas (Rapporteur).

4.7. Evaluation de la recherche

Re-lectures de revue

Relecture régulière de 2001 à 2007 pour la revue «Journal Européen des Systèmes Automatisés» (**JESA**), Hermès Ed., Paris, une quinzaine de papiers expertisés.

Relecture en 2005 et 2008 pour la revue «Journal of Intelligent Manufacturing» (**JIM**), Springer.

Relecture en 2008 pour la revue «Engineering Applications of Artificial Intelligence» (**EAAI**), Elsevier.

Relecture en 2007 pour la revue «International Journal of Production Economic» (**IJPE**), Elsevier.

Relecture en 2007 pour la revue «Simulation Modelling Practice and Theory» (**SIMPAT**), Elsevier.

Relecture pour la revue «Journal of Decision System» (**JDS**), Hermès Ed., Paris

Comités scientifiques de congrès

JD/JN/Ecole MACS 2011 : Membre du comité d'organisation

CETISIS'10 : Membre du comité de programme

Congrès pédagogique du club EEA, Grenoble, 8-10 mars 2010

CETISIS'08 : Membre du comité de programme

Congrès pédagogique du club EEA, Bruxelles, 27-29 octobre 2008

MOSIM'08 : Membre du comité de programme

7^{ème} conférence de MODélisation et de SIMulation ; Paris, 31 mars-2 avril 2006

CETISIS'07 : Membre du comité de programme

Congrès pédagogique du club EEA, Bordeaux, 29-31 octobre 2007

JDMACS'07 : Membre du comité de programme

Journées des Doctorants du GDR MACS ; Reims, 9-11 juillet 2007

CIGI2007 : Membre du comité de programme

7^{ème} Congrès International de Génie Industriel ; 3 Rivières, 5-7 juin 2007

MOSIM'06 : Membre du comité de programme

6^{ème} conférence de MODélisation et de SIMulation ; Rabat, 3-5 avril 2006

CETISIS'05 : Membre du comité de programme

Congrès pédagogique du club EEA, Nancy, 25-27 octobre 2005

JDMACS'05 : Membre du comité de programme

Journées des Doctorants du GDR MACS ; Lyon, 5-7 septembre 2005

CIGI2005 : Membre du comité de programme

6^{ème} Congrès International de Génie Industriel ; Besançon, 7-10 juin 2005

HMS 2001 : Membre du comité de programme

International Workshop on Harbour, Maritime & Multimodal Logistics Modelling and Simulation ; Marseille, 15-17 octobre 2001

GSI'4 : Membre du comité d'organisation

Responsable de l'exposition scientifique et technique ; Marseille, décembre 1993

Relectures de congrès

Relecture pour CETISIS'08, MOSIM'08, CETISIS'07, CIGI2007, INCOM'06, MOSIM'06, CETISIS'05, JDMACS'05, CIGI2005, MOSIM'04, HMS 2001, ESS'01, CIGI2001, MOSIM'01, GSI4 (1993)

4.8. Participation aux instances locales et nationales d'évaluation

Instances locales d'évaluation

Membre de la commission de spécialistes de l'ENI de Metz : 1998 - 2002.

Membre de la commission de spécialistes de l'Université de Toulon : 2004 - 2008.

Membre de la commission de spécialistes de l'ENSAM : 2004 - 2008.

Instances nationales d'évaluation

Membre élu du Conseil National des Universités, en 61ème section (traitement du signal, génie informatique et automatique), en 1999, puis en 2003.

Assesseur du bureau de la 61ème section du CNU de 2000 à 2007,

Membre du Groupe IX du CNU.

5. CONTRATS, PROJETS ET TRANSFERT

5.1. Contrats de recherche industriels

Contrats actuels

Contrat InterVascular – LSIS, *«Étude et analyse de l'aide à la décision multicritère pour l'ordonnancement temps réel d'atelier»*,
Responsable du Contrat (8000 € /an)
de septembre 2008 à septembre 2010

Contrats achevés

Contrat Eurocopter – LSIS, *«Étude de la mise en ligne de l'unité 4-5 selon une approche juste à temps»*,
financement d'une stagiaire MR SIS,
Responsable du Contrat EC-2006-266 (7500 €)
de mars 2006 à mars 2007

Contrat Région PACA – ST Microelectronics – LSIS, *«Validation par simulation du pilotage par Workflow des demandes de modification process (ECN)»*
participation sur le thème 'pilotage proactif', financement de divers stagiaires,
de septembre 2004 à septembre 2006

Contrat Atout Région PACA – Arcane PM – LSIS, *«GEMES : un MES pour PME-PMI (phase 2) : Étude de faisabilité d'un prototype et validation industrielle»*,
de mars 2004 à décembre 2004

Contrat Atout Région PACA – Arcane PM – LSIS, *«GEMES : un MES pour PME-PMI (phase 1) : Étude & spécification du produit GEMES»*,
de septembre 2003 à mars 2004

Contrat ANVAR – EASY Park – DIAM, *«Conception du système de pilotage décentralisé d'un Système de Transport Robotisé élaboré dans le cadre d'un projet de Parc de Stationnement Sécurisé»*,
Responsable du Contrat ANVAR AJIT J00 10 031U JJ (1500 €)
de septembre 2000 à septembre 2001

5.2. Projets de recherche

Projet de ressourcement scientifique Carnot STAR

Le projet 'RFID Holonic Manufacturing' vise la mise en place d'une plateforme pour le test et l'intégration de solutions RFID dans le cadre d'un système de pilotage holonique, en vue d'applications en production manufacturière, en traçabilité et en logistique.

L'Institut Carnot STAR apporte une large part du budget nécessaire pour l'achat d'équipements RFID et de la plateforme de transistive. L'objectif est de pouvoir conduire des expérimentations sur les technologies infotroniques en situation réelle d'exploitation.

Responsable du projet (30000 €)

5.3. Actions de transfert industriel

Année	Intitulé de la mission	Type	Entreprise
2009-10	Spécification d'un WorkFlow pour le e_management de l'Institut Carnot STAR	PFE GII	Institut Carnot STAR
2008-09	Analyse de l'ordonnancement d'une salle blanche	PFE GII	InterVascular
2007-08	Spécification d'un e_PGI pour le management de l'Institut Carnot STAR	PFE GII	Institut Carnot STAR
2006/07	Analyse des logiciels d'ordonnancement interfacés avec SAP en vue d'un choix de pilotage orienté 'écoulement des flux'	PFE GII	Eurocopter
	Étude du déménagement et de la réimplantation d'un système de production	PFE GII	AuxiFer - M13
2005/06	Mise au point d'un modèle de simulation et d'analyse de performance pour l'unité 4-5	PFE GII	Eurocopter
	Étude et classification automatique des procédés de production micro électronique	PFE GII	ST Microelectronics
2004/05	Conception d'une heuristique pour la mise en flowshop des unités 4 & 5	PFE GII	Eurocopter
	Modélisation processus de l'entreprise en vue d'une certification ISO 9001:2000	PFE GII	Provac
	Spécification d'une passerelle entre l'ERP Adonix et le MES GEMES	PFE GII	Arcanes Informatique
2003/04	Étude et mise au point d'une machine d'empilement - piétage de circuits imprimés	PRT GII	GII
	Étude et diagnostic de productivité du système de production de brosses et balais	PFE GII	Brosserie Jeanne d'Arc
2002/03	Spécification d'un MES à base de lecteurs de codes barres pour les PME-PMI	PFE GII	Arcane Production
	Étude de préconception d'une machine robotisée pour l'aide à la retouche de circuits imprimés	PFE GII	Delta CI
	Réalisation d'un MES à base de lecteurs de codes barres pour les PME-PMI	PRT GII	Arcane Production
2001/02	Étude et validation par simulation de stratégies d'ordonnancement sur un flow shop	PFE GII	Delta CI
	Étude de préconception d'une machine robotisée pour l'aide à la retouche de circuits imprimés	PFE GII	Delta CI
2000/01	Réalisation d'une interface de supervision sous Windows pour le MégaTorque NSK	PRT GII	NSK France
	Étude d'un système de lancement – suivi en lien avec la GPAO	PFE IUSPIM	Delta CI
	Étude d'une démarche de certification environnementale ISO 14001	PFE GII	Lafarge Couverture

1999 / 2000	Réalisation d'une interface de supervision pour le MégaTorque NSK	PRT IUSPIM	Kornstein SA
	Spécification de la fonction de planification sur la ligne de production «mémoire»	PFE IUSPIM	GEMPLUS
1998/99	Étude de préconception d'une machine pour déballer les produits mous	PFE IUSPIM	Saman
	Étude d'un Système de Production dans le secteur de la céramique industrielle	PFE IUSPIM	Réalisations Saint Gelais Inc.
1997/98	Étude de l'implantation d'un flow shop avec contraintes d'environnement	PFE IUSPIM	Delta CI
1996/97	Étude du déménagement d'un flow shop sans fermeture d'usine	PFE IUSPIM	Delta CI
1994/95	Mise en place d'une démarche Qualité du Centre de Ressources Technologiques Polyvalor	PFE IUSPIM	IUSPIM
	Participation à la mise en place d'un Système Qualité ISO 9001 pour le service informatique	PFE IUSPIM	Image Technologie

Tableau 2 : Synthèse de l'ensemble des projets de transfert de technologie

6. DIFFUSION SCIENTIFIQUES DES TRAVAUX

Type de diffusion scientifique	Nombre
Publications dans des revues internationales avec comité de lecture	13
Publications dans des revues nationales avec comité de lecture	1
Éditoriaux dans des revues internationales	2
Chapitres dans des ouvrages collectifs avec comité de lecture	9
Communications dans des congrès internationaux avec comité de lecture et actes	37
Communications dans des congrès internationaux sans actes	2
Communications dans des congrès nationaux avec comité de lecture et actes	5
Rapports de contrats	10
Mémoires	2
Communications dans des colloques et journées nationaux sans actes	19
Soumissions en cours dans des revues internationales	3
TOTAL	105

Tableau 3 : Synthèse de la diffusion scientifique depuis 1988

6.1. Publications dans des revues internationales avec comité de lecture

[RI13] **Grégory Zacharewicz, Patrick Pujo, Claudia Frydman, Norbert Giambiasi**, «Environnement G-DEVS / HLA pour la simulation distribuée de systèmes de production multi processus», *in: Journal of Decision System (JDS)*, vol. **18**, n°3, pp. 375-402, septembre 2009.

[RI12] **Fouzia Ounnar, Patrick Pujo**, «Pull control for Job Shop: HMS approach using multicriteria decision-making», *in: Journal of Intelligent Manufacturing (JIM)*, 2009, doi: 10.1007/s10845-009-0288-4. (*Springer; impact factor: 1,018*)

[RI11] **Patrick Pujo, Fouzia Ounnar, Pascal Blanc**, «Pilotage des systèmes manufacturiers via une analyse multicritère intégrant Produit, Ressource et Ordre. Application au pilotage en flux tiré d'un Job Shop», *Journal Européen des Systèmes Automatisés (JESA)*, vol. **43**, n°3/4, pp. 435-462, mai 2009

[RI10] **Patrick Pujo, Nicolas Broissin, Fouzia Ounnar**, «PROSIS: An isoarchic structure for HMS control», *Engineering Applications of Artificial Intelligence (EAAI)*, vol. **22**, n°3/4, pp. 1034-1045, mars 2009 doi:10.1016/j.engappai.2009.01.011. (*Elsevier; impact factor: 1,397*)

[RI09] **Lynda Mekaouche, Fouzia Ounnar, Patrick Pujo, Norbert Giambiasi**, «Another way to manage a supply chain: holonic and multicriteria approach», *in: Logistics Systems and Management (LSM)*, vol. **5**, n° 3/4, pp. 396-417, 2009 (*Inderscience*)

- [RI08] **Fouzia Ounnar, Patrick Pujo, Lynda Mekaouche, Norbert Giambiasi**, «Integration of a Flat Holonic Form in an HLA Environment», in: *Journal of Intelligent Manufacturing (JIM)*, vol. **70**, n° 1, pp. 91-111, 2009, DOI: 10.1007/s10845-008-0106-4. (Springer; impact factor: 1,018)
- [RI07] **Patrick Pujo, Fouzia Ounnar**, «Vers une approche holonique des Systèmes Mécatroniques Complexes : proposition d'un système de pilotage auto organisé et isoarchique», in: *Journal Européen des Systèmes Automatisés (JESA)*, vol. **41**, n° 6, pp. 673-706, 2007 (Hermès-Lavoisier)
- [RI06] **Fouzia Ounnar, Patrick Pujo, Lynda Mekaouche, Norbert Giambiasi**, «Customers-Suppliers Relationship Management in an Intelligent Supply Chain», in: *Production, Planning and Control (PPC)*, vol. **18**, n° 5, pp. 377-387, 2007 (Taylor & Francis; impact factor: 0,597)
- [RI05] **Patrick Pujo, Massimo Pedetti, Norbert Giambiasi**, «Formal DEVS modelling and simulation of a Flow-Shop relocation method without interrupting the production», in: *Simulation Modelling Practice and Theory (SIMPRAT)*, vol. **14**, pp. 817-842, 2006 (Elsevier; impact factor: 0,586)
- [RI04] **Patrick Pujo, Fouzia Ounnar, Cecilia Zanni**, «A self organized holonic control for mechatronics complex systems: application to a robotized car park», in: *International Journal of Automation Austria (IJAA)*, vol. **13** (special issue 2005), pp. 115-126, 2006, (ISSN 1562 – 2703)
- [RI03] **Fouzia Ounnar, Patrick Pujo**, «Supplier evaluation process within a self-organized logistical network», in: *International Journal of Logistics Management (IJLM)*, vol. **16**, n° 1, pp. 159-172, 2005 (Emerald, ISSN 0957-4093)
- [RI02] **Patrick Pujo, Maurice Pillet**, «Control by quality: proposition of a typology», in: *International Journal of Quality Assurance: Good Practice, Regulation, and Law (IJQA)*, vol. **9**, n° 2, pp. 99-125, 2002 (Taylor & Francis, ISSN 1052-9411)
- [RI01] **Patrick Pujo, Fouzia Ounnar**, «Proposition d'un pilotage décentralisé, auto-organisé et rapproché pour système automatisé flexible : Application à un Hub de transbordement robotisé fer-fer», in: *Journal Européen des Systèmes Automatisés (JESA)*, vol. **35**, n° 7-8, pp. 905-932, 2001. (Hermès-Lavoisier)

6.2. Publications dans des revues nationales avec comité de lecture

- [RN01] **Patrick Pujo**, «Étude par simulation de la suppression de l'impact des arrêts lors du déménagement d'une ligne de production manufacturière», in: *Revue Française de Gestion Industrielle (RFGI)*, vol. **21**, n° 1, pp. 73-87, 2002.

6.3. Editoriaux dans des revues internationales

- [EI02] **Patrick Pujo, André Thomas, Damien Trentesaux**, Editorial du numéro spécial 'Systèmes Contrôlés par le Produit', in: *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, 2009. (Hermès-Lavoisier)
- [EI01] **Damien Trentesaux, Patrick Pujo**, Editorial du numéro spécial 'Pilotage distribué des systèmes de production', in: *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, vol. **35**, n° 7-8, pp. 855-857, 2001. (Hermès-Lavoisier)

6.4. Chapitres dans des ouvrages collectifs avec comité de lecture

- [OC09] **Fouzia Ounnar, Patrick Pujo, Selma Limam Mansar**, « Partnership network for an intelligent supply chain », in: *Electronic Supply Network Coordination in Intelligent and Dynamic Environment: Modeling and Implementation*, Edited by: Shima Mohebbi, Iraj Mahdavi, Namjae Cho, IGI Global, 2010.

- [OC08] **Fouzia Ounnar, Patrick Pujo**, «Isoarchic and Multi-criteria Control of Supply Chain Network», in: *Artificial Intelligence Techniques for Networked Manufacturing Enterprises Management*, (chapitre 6) Edited by: Lyes Benyoucef, Bernard Grabot, *Springer-Verlag*, ISBN 978-1-84996-118-9, 2010.
- [OC07] **Fouzia Ounnar, Bernard Archimède, Patrick Pujo, Philippe Charbonnaud**, «Approches de simulation distribuée intégrant HLA pour la chaîne logistique», in: *Simulation pour le pilotage de la chaîne logistique*, *Hermès Science*, 2008.
- [OC06] **Fouzia Ounnar, Bernard Archimède, Patrick Pujo, Philippe Charbonnaud**, «HLA Distributed Simulation Approaches for Supply Chain», In: *Simulation for Supply Chain Management*, Edited by: Caroline Thierry, André Thomas, Gérard Bel. 257-294 *Wiley-ISTE* (Ed.), 2008.
- [OC05] **Patrick Pujo, Daniel Brun-Picard**, «Pilotage sans plan prévisionnel ni ordonnancement préalable», in: *Collection IC2 - Productique : Méthodes du pilotage des systèmes de production*, *Hermès Science Europe Ltd*, 2002.
- [OC04] **Maurice Pillet, Patrick Pujo**, «Pilotage par la Qualité», in: *Collection IC2 - Productique : Méthodes du Pilotage des Systèmes de Production*, *Hermès Science Europe Ltd*, 2002.
- [OC03] **Patrick Pujo, Jean-Paul Kieffer**, «Avant Propos - Présentation de l'ouvrage 'Méthodes du pilotage des systèmes de production'», in: *Collection IC2 - Productique : Méthodes du Pilotage des Systèmes de Production*, *Hermès Science Europe Ltd*, 2002.
- [OC02] **Patrick Pujo, Jean-Paul Kieffer**, «Concepts fondamentaux du pilotage des systèmes de production», in: *Collection IC2 - Productique : Fondements du Pilotage des Systèmes de Production*, *Hermès Science Europe Ltd*, 2002.
- [OC01] **Patrick Pujo, Jean-Paul Kieffer**, «Avant Propos – Présentation de l'ouvrage : 'Fondements du pilotage des systèmes de production'», in: *Collection IC2 - Productique : Fondements du Pilotage des Systèmes de Production*, *Hermès Science Europe Ltd*, 2002.

6.5. Communications dans des congrès et colloques internationaux avec comité de lecture et actes

- [CI37] **Patrick Pujo, Fouzia Ounnar**, «Intégration des technologies infotroniques dans le système de pilotage PROSIS», in: *CIGI'09 (8^{ème} Congrès international de génie industriel)*, *Bagnères de Bigorre*, 10-12 juin 2009.
- [CI36] **Pascal Blanc, Patrick Pujo, Fouzia Ounnar**, «A simulation testbed for evaluating self-organizing heuristics for holonic and isoarchic manufacturing control system», in: *ICEEDT'08, (2nd International Conference on Electrical Engineering Design and Technologies)*, *Hammamet, Tunisie*, 8-10 novembre 2008.
- [CI35] **Patrick Pujo, Fouzia Ounnar**, «Pull System Control for Job Shop Via a Holonic, Isoarchic & Multicriteria Approach», in: *17th IFAC World Congress, Séoul, Corée*, 6-11 juillet 2008.
- [CI34] **Fouzia Ounnar, Patrick Pujo, Lynda Mekaouche, Norbert Giambiasi**, «Modélisation d'un système de pilotage isoarchique et validation par simulation distribuée via HLA», in: *MOSIM'08, 5^o Conférence Internationale de MODélisation et SIMulation, Paris, France*, 30 mars – 2 avril 2008.
- [CI33] **Patrick Pujo, Fouzia Ounnar**, «Un modèle holonique et isoarchique pour le pilotage d'un job shop en flux tiré», in: *MOSIM'08, 5^o Conférence Internationale de MODélisation et SIMulation, Paris, France*, 30 mars – 2 avril 2008.
- [CI32] **Patrick Pujo, Grégory Zacharewicz, Claudia Frydman, Norbert Giambiasi**, «Pilotage assisté par simulation distribuée dans l'industrie du semi conducteur», in: *MOSIM'08, 5^o Conférence Internationale de MODélisation et SIMulation, Paris, France*, 30 mars – 2 avril 2008.

- [CI31] **Patrick Pujo, Mayssa Zammouri, Fouzia Ounnar**, «Pilotage holonique d'un Job Shop : approche auto organisée, temps réel et multicritères», *in: 7e Congrès international de génie industriel, Trois-Rivières, Québec, Canada*, 5-8 juin 2007.
- [CI30] **Patrick Pujo**, «Déploiement d'une démarche Qualité dans un Institut Carnot en création», *in: 7e Congrès international de génie industriel, Trois-Rivières, Québec, Canada*, 5-8 juin 2007.
- [CI29] **Fouzia Ounnar, Lynda Mekaouche, Patrick Pujo, Norbert Giambiasi**, «Validation of a self organised control system for logistic partnership network by distributed simulation», *in: IESM 2007 (International Conference on Industrial Engineering and Systems Management), Pekin, Chine*, 30 mai – 2 juin 2007.
- [CI28] **Lynda Mekaouche, Fouzia Ounnar, Asmaa Taïbi, Patrick Pujo**, «Self Organized Control of Partnership Network: Modeling and Validation via Simulation», *in: AIS-CMS 2007, I3M'07 (International Modeling & Simulation Multiconference 2007)*, Acts CDROM, 6 pages (137.pdf), *Buenos Aires, Argentine*, 8-10 février 2007.
- [CI27] **Fouzia Ounnar, Patrick Pujo, Olivier Sauvan**, «Pull Production In A Job Shop: Proposition Of A Self Organized Control By Virtual Flow Shop And Multicriteria Analyzes», *in: ICMAS'06, Bucarest, Roumanie*, 26-27 octobre 2006.
- [CI26] **Fouzia Ounnar, Patrick Pujo, Amar Zahaf, Norbert Giambiasi**, «Interoperability of Enterprises Network Holonic Control via HLA», *in: INCOM'06*, pp.579-584, *St Etienne, France*, 17-19 mai 2006.
- [CI25] **Lynda Mekaouche, Fouzia Ounnar, Patrick Pujo, Norbert Giambiasi**, «Another way to manage supply chain», *in: ILS'06, International Conference on Information Systems, Logistics and Supply Chain*, Acts CDROM, 10 pages (if_mekaouche.html), *Lyon, France*, 15-17 mai 2006.
- [CI24] **Lynda Mekaouche, Fouzia Ounnar, Patrick Pujo, Norbert Giambiasi**, «Self Evaluation of Company's Performance in Partnership Network», *in: IEMC'05, IEEE International Engineering Management Conference*, pp.451-455, *St. John's, Newfoundland, Canada*, 11-14 septembre 2005.
- [CI23] **Lynda Mekaouche, Fouzia Ounnar, Patrick Pujo, Norbert Giambiasi**, «Management of calls for proposals within self organized enterprises network», *in: IMP'05, 21st Annual Industrial Marketing & Purchasing Conference*, Acts CDROM, 10 pages (Mekaouche_Ounnar_Pujo_Giambiasi_XW126.pdf), *Rotterdam, Pays Bas*, 1-3 septembre 2005.
- [CI22] **Lynda Mekaouche, Fouzia Ounnar, Patrick Pujo, Norbert Giambiasi**, «Customers – Suppliers relationship self organized control modelling using DEVS formalism», *in: IMACS'05, 17th IMACS World Congress Scientific Computation, Applied Mathematics and Simulation*, Acts CDROM, 8 pages (T4-I-116-0849.pdf), *Paris, France*, 11-15 juillet 2005.
- [CI21] **Lynda Mekaouche, Fouzia Ounnar, Patrick Pujo, Norbert Giambiasi**, «DEVS modeling of self organized companies' network», *in: ESM05, 19th European Simulation Multiconference*, *Riga, Latvia*, 1-4 juin 2005.
- [CI20] **Lynda Mekaouche, Fouzia Ounnar, Patrick Pujo, Norbert Giambiasi**, «Modélisation DEVS de la gestion des appels d'offres au niveau d'un réseau de chaîne logistique auto organisé», *in: 6e Congrès International de Génie Industriel*, Actes CDROM, 10 pages (076-CIGI2005.pdf), *Besançon, France*, 7-10 juin 2005.
- [CI19] **Patrick Pujo, Fouzia Ounnar, Cecilia Zanni**, «A self organized holonic control for mechatronics complex systems: application to a robotized car park», *in: AUS-ISM05, 2^o International Symposium on Mechatronics*, *Sharjah, UAE*, 19-21 avril 2005.
- [CI18] **Patrick Pujo, Massimo Pedetti, Norbert Giambiasi**, «Relocation of a flow-shop, without interrupting the production: optimization by DEVS modelisation and simulation», *in: SCSC2004, Summer Computer Simulation Conference*, *San Jose, California, USA*, 25-29 juillet 2004.

- [CI17] **Fouzia Ounnar, Patrick Pujo, Lynda Mekaouche, Norbert Giambiasi**, «Decentralized Self Organized Control of a Partnership Network in an Intelligent Supply Chain», in: *IMS International Forum 2004: Global Challenges in Manufacturing*, pp.1311-1326, *Cernobbio, Italy*, 17-19 mai 2004.
- [CI16] **Fouzia Ounnar, Hanen Bouchriha, Patrick Pujo, Pierre Ladet, Sophie D'Amours**, «Faire ou faire-faire dans un réseau logistique auto-organisé», in: *5e Congrès International de Génie Industriel, Québec, Canada*, 26-29 octobre 2003.
- [CI15] **Virgile Riccardi, Patrick Pujo, Claudia Frydman**, «DEVS Modelling For The Proactive Control By Simulation Of Kanban Production Lines», in: *The International Workshop on Modeling & Applied Simulation (MAS 2003)*, *Italy*, 2-4 octobre 2003.
- [CI14] **Patrick Pujo, Maurice Pillet**, «Duality between control and quality», in: *QUALITA 2003*, *Nancy, France*, 19-21 mars 2003.
- [CI13] **Fouzia Ounnar, Patrick Pujo**, «Décentralisation des mécanismes de pilotage de la relation donneurs d'ordres / fournisseur», in: *4e Congrès International de Génie Industriel*, Vol. 2, pp.1175–1185, *Aix-en-Provence, Marseille*, 2001.
- [CI12] **Patrick Pujo, Fouzia Ounnar**, «Decentralised control and self organisation in flexible manufacturing systems», in: *ETFA'2001, 8th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation*, *Antibes, France*, 2001.
- [CI11] **Patrick Pujo, Fouzia Ounnar**, «Task Decentralised Scheduling in a Hub, », in: *Harbour Maritime & Multimodal Logistics Modelling and Simulation (HMS'2001)*, *Marseille, France*, 2001.
- [CI10] **Patrick Pujo, Nicolas Broissin, Sylvie Meyer, Jean Claude Bertrand**, «Pilotage décentralisé des Systèmes de Production», in: *3e Congrès International de Génie Industriel*, pp. 1975-1984, *Montréal*, 1999.
- [CI09] **Patrick Pujo, Jean Peyrot, Alexis Sevestre**, «Déménagement d'une ligne de production sans interruption de l'activité», in: *3e Congrès International de Génie Industriel*, pp. 345-356, *Montréal*, 1999.
- [CI08] **Patrick Pujo, Nicolas Broissin, Jean Claude Bertrand** «Evaluation de règles de génération de tâches dans le contexte du pilotage décentralisé d'un Système de Production Automatisé et Flexible», in: *2^{ème} Congrès Franco Québécois de Génie Industriel, Albi*, Septembre 1996
- [CI07] **Bagher Asgari, Patrick Pujo, Bao Nguyen, Jean Claude Bertrand**, «Modelization and Identification Technological Characteristics of Industrial Robots», in: *CESA'96/IEEE, Symposium on Robotics and Cybernetics*, *Lille, France*, Juillet 1996
- [CI06] **Nicolas Broissin, Patrick Pujo, Jean Claude Bertrand** «Decentralized Piloting of Transport Systems by Autonomous Vehicles», in: *WAC96*, *Montpellier, France*, Mai 1996
- [CI05] **Patrick Pujo, Nicolas Broissin, Jean Claude Bertrand**, «Simplification de la programmation de Tâches dans les SAP par l'intégration de primitives 'métier' dans les Machines de Production», in: *5^o Congrès International de Génie Industriel (GI'5)*, *Grenoble, France*, Avril 1996
- [CI04] **Patrick Pujo, Nicolas Broissin, Jean Claude Bertrand**, «Une nouvelle approche de l'ordonnancement des systèmes de production automatisés flexibles par la mise en concurrence des ressources», in: *1^o Congrès International Franco-Québécois de Génie Industriel, Montréal, France*, 18 - 20 octobre 1995
- [CI03] **Gérard Massé, Patrick Pujo, Jean Claude Bertrand**, «Towards a mechatronics architecture of industrial robots», in: *2ème Congrès Franco-Japonais de Mécatronique, Japon*, Novembre 1994.
- [CI02] **Patrick Pujo, Jean Claude Bertrand**, «La décentralisation de l'ordonnancement : une solution pour augmenter la flexibilité et la réactivité des systèmes avancés de production», in: *4ème Congrès International de Génie Industriel, Marseille, France*, Décembre 1993.
- [CI01] **Dadan Umar Daihani, Patrick Pujo, Jean Paul Kieffer**, «A conceptual approach of a new architecture of the computer aided quality management Systems, toward their better integration with the

other production management functions», in: *First Newcastle International Conference on Quality and its applications*, Newcastle, Septembre 1993

6.6. Communications dans des congrès internationaux sans actes

[CS02] **Fouzia Ounnar, Patrick Pujo**, «Decentralized use of Analytic Hierarchy Process for Holonic Manufacturing System control», in: OR'50, York (UK) 9-11 Septembre 2008.

[CS01] **Patrick Pujo, Pierre Méreau, Fouzia Ounnar**, «Controlled System by Product: hlonic, self-organized and isoarchival approach», in: FOURMILIERE WorkShop, Bremen (DR), 22-23 Mars 2007.

6.7. Communications dans des congrès nationaux avec comité de lecture et actes

[CN05] **Patrick Pujo, Fouzia Ounnar, Pierre Méreau**, «Le projet GEM (Global Education in Manufacturing)», Dans : CETSIS'2005, Congrès pédagogique du club EEA, Nancy, France, 25-27 octobre 2005.

[CN04] **Patrick Pujo, Massimo Pedetti, Fouzia Ounnar**, «Pilotage proactif des lignes de production kanban par modélisation DEVS et simulation temps réel», Dans : MOSIM'04, 5^e Conférence Francophone de MODélisation et SIMulation, Nantes, France, 1-3 septembre 2004.

[CN03] **Patrick Pujo**, «Déménagement d'une ligne de production manufacturière sans arrêt de l'activité de production», Dans : MOSIM'01, 3^eme Conférence de MODélisation et de SIMulation, Troyes, France, 2001.

[CN02] **Patrick Pujo**, «Robsilon : un outil de simulation pour appréhender et identifier des caractéristiques métrologiques sur les robots industriels polyarticulés», Dans : 6^eme Congres International de Métrologie, Lille, France, Octobre 1993.

[CN01] **Jean Claude Bertrand, Daniel Brun-Picard, Patrick Pujo**, «CIM : vers une mise en oeuvre décentralisée du système de production pour une meilleure intégration des fonctions de conception, production et gestion», Dans : Congrès "CIM90 : Productique et Intégration", Bordeaux, France, Juin 1990.

6.8. Rapports de contrats

[RC10] **Grégory Zacharewicz, Patrick Pujo** «Plateforme de simulation distribuée GDEVs-HLA pour le pilotage assisté des processus décisionnels dans l'industrie du semi conducteur», Rapport d'avancement LSIS-ST Microelectronics, 2008.

[RC09] **Mayssa Zammouri, Patrick Pujo** «étude de la mise en ligne de l'unité 4-5 selon une approche juste à temps», Rapport LSIS-Eurocopter, n°233-2006, 2006.

[RC08] **Amar Zahaf, Patrick Pujo** «Validation par simulation du pilotage par Workflow des demandes de modification process (ECN) : modélisation DEVS du process», Rapport d'avancement LSIS-ST Microelectronics, 2006.

[RC07] **Patrick Pujo, Fouzia Ounnar, Massimo Pedetti**, «Projet GEMES : spécification de l'interfaçage avec un ERP», Rapport de contrat ATOUT, 2005.

[RC06] **Patrick Pujo, Massimo Pedetti, Romain Bouniol, Fouzia Ounnar**, «Projet GEMES : contribution à la réalisation d'un pilotage proactif», Rapport de contrat ATOUT, 2004.

[RC05] **Patrick Pujo, Romain Bouniol**, «Projet GEMES : étude de faisabilité d'un prototype», Rapport de contrat ATOUT, 2004.

- [RC04] **Patrick Pujo, Virgile Ricciardi**, «Projet GEMES : étude et spécification du produit», Rapport de contrat ATOUT, 2003.
- [RC03] **Pierre Mereau, Fouzia Ounnar, Patrick Pujo**, «Project GEM-Europe - Best Manufacturing Practices ; Report on demonstrator evaluation», Rapport de contrat IMS GEM-Europe, 2004.
- [RC02] **Pierre Mereau, Fouzia Ounnar, Patrick Pujo**, «Project GEM-Europe - Best Manufacturing Practices ; Report on selected French enterprises», Rapport de contrat IMS GEM-Europe, n° LSIS.RR.2002.001, 2002.
- [RC01] **Patrick Pujo, Jean Philippe Charbonné**, «Conception du système de pilotage décentralisé d'un Système de Transport Robotisé élaboré dans le cadre d'un projet de Parc de Stationnement Sécurisé», Rapport de contrat ANVAR AJIT J00 10 031U/JJ, 2002.

6.9. Mémoires

- [M02] **Patrick Pujo**, «Contribution à la définition d'une modélisation technologique des robots industriels», Mémoire de thèse de Doctorat en Sciences, spécialité : "Automatique et Informatique", Université d'Aix-Marseille III, 16 Novembre 1994.
- [M01] **Patrick Pujo**, «Contribution à la programmation de tâches dans les Systèmes de Production Automatisés Flexibles», Mémoire de Diplôme d'Études Approfondies, spécialité : "Automatique et Informatique XIAO", Université d'Aix-Marseille III, Septembre 1988.

6.10. Communications dans des colloques et journées nationales sans actes

- [JN19] **Patrick Pujo**, «Management Intégré pour les processus de gestion de projet dans l'Institut Carnot STAR», École d'été 'Qualité en Recherche en Enseignement Supérieur', La Grande Motte, France, 9-11 Septembre 2009
- [JN18] **Patrick Pujo**, «Présentation de la démarche de Management Intégré de l'Institut Carnot STAR», Journée thématique 'Démarche Qualité', Comité de Partage des Bonnes Pratiques, Association Inter Carnot, Paris, France, 30 juin 2009
- [JN17] **Patrick Pujo, Nabil Salem, Thamer Louati**, «Présentation du site Internet et de l'Intranet de l'Institut Carnot STAR (Déploiement de la démarche Qualité)», Journée Inter Université - Institut Carnot STAR pour la valorisation et le partenariat, Marseille, France, 5 décembre 2008
- [JN16] **Fouzia Ounnar, Patrick Pujo**, «Pilotage auto organisé de la relation Clients-Fournisseurs : simulation de chaînes logistiques», in: Groupe OGP-Vendôme (GDR MACS, pôle STP), Paris, France, 7 décembre 2006.
- [JN15] **Lynda Mekaouche, Fouzia Ounnar, Patrick Pujo, Norbert Giambiasi**, «Pilotage auto organisé de la relation Clients-Fournisseurs», in: Groupe OGP (Organisation et Gestion de la Production / GDR MACS, pôle STP), Aix-en-Provence, France, 21-22 octobre 2004.
- [JN14] **Massimo Pedetti, Patrick Pujo, Norbert Giambiasi**, «GEMES : conception d'un MES pour PME-PMI», in: Groupe ERP (Enterprise Ressource Planning / GDR MACS, pôle STP), Aix-en-Provence, France, 21-22 octobre 2004.
- [JN13] **Massimo Pedetti, Patrick Pujo, Norbert Giambiasi**, «Modélisation DEVS et simulation du déménagement d'un flow shop sans interruption de la production», in: Groupe CSP (Conception des Systèmes de Production / GDR MACS, pôle STP), Aix-en-Provence, France, 21-22 octobre 2004.

- [JN12] **Fouzia Ounnar, Ingrid Hunt, Patrick Pujo, Pierre Méreau**, «Global Education in Manufacturing. An cursus overview», in: journées finales du Projet GEM - GDR MACS, pôle STP, Aix-en-Provence, France, 21-22 octobre 2004.
- [JN11] **Pierre Méreau, Asbjorn Rolstadas, Fouzia Ounnar, Patrick Pujo**, «Le projet GEM (Global Education in Manufacturing) : une offre de formation en e-learning pour la productique», in: journées finales du Projet GEM - GDR MACS, pôle STP), Aix-en-Provence, France, 21-22 octobre 2004.
- [JN10] **Pierre Méreau, Fouzia Ounnar, Patrick Pujo**, «Global Education in Manufacturing. An IMS Project», in: Groupe OGP/GRP (Organisation et Gestion de la Production / Groupement pour la Recherche en Productique), Tarbes, France, 2002.
- [JN09] **Patrick Pujo**, «Caractérisation de la performance d'un robot industriel par sa modélisation géométrique et technologique», in: journées thématiques AIP-Primeca ; Multi-représentations géométriques en CMAO ; ENSAM Aix-en-Provence, 22 novembre 2001
- [JN08] **Patrick Pujo, Jean Paul Kieffer**, «Inventaire et analyse des travaux de recherche français sur le Pilotage des Systèmes de Production. Tentative de synthèse d'une définition», in: Groupes OGP/COMPIL/SPSF, Groupement pour la Recherche en Productique, LAMIH, Valenciennes, 2000.
- [JN07] **Patrick Pujo, Fouzia Ounnar**, «Pilotage réactif des Systèmes de Production par génération décentralisée de Tâches», in: Groupes SPSF/COMPIL, Groupement pour la Recherche en Productique, LAMIH, Valenciennes, 2000.
- [JN06] **Nicolas Broissin, Patrick Pujo**, «Architecture décentralisée de pilotage des SPAF», in: session poster ; Journées de Synthèse du Groupement pour la Recherche en Productique, Marseille, Mars 1999
- [JN05] **Patrick Pujo**, «Pilotage décentralisé des Systèmes de Production", in: Groupe COMPIL «Commande et Pilotage" Groupement pour la Recherche en Productique, LAB, Besançon, 1998.
- [JN04] **Patrick Pujo**, «QUALISPIM : Témoignage d'une démarche qualité dans une école d'ingénieurs en Génie Industriel», in: Journée thématique du mois de la qualité PACA "Evolution de la démarche qualité dans les systèmes de formation initiale et continue", MFQ PACA, Marseille, 21 novembre 1997.
- [JN03] **Jean-Michel Olive, Patrick Pujo**, «Les robots : recherche et applications industrielles», conférences de l'association de vulgarisation scientifique AUDISTE, Marseille, France, 1996
- [JN02] **Patrick Pujo**, «Analyse du comportement technologique de la mécanique des robots industriels», in: commission CAO Robotique de l'Association Française de Robotique Industrielle, Paris, France, 1995
- [JN01] **Jean-Michel Olive, Patrick Pujo, Jean Claude Bertrand**, «Opérateurs modulaires de pilotage d'axes pour machines outils et robots», congrès du Club EEA, Angers, 1995

6.11. Soumissions en cours dans des revues internationales

- [RS03] **Thamer Louati, Fouzia Ounnar, Patrick Pujo**, «Analyse comparée de l'usage de AHP & ANP pour l'aide à la décision multicritère en Pilotage», en cours
- [RS02] **Fouzia Ounnar, Olivier Labarthe, Benoit Montreuil, Patrick Pujo, Damien Lemieux**, «Multicriteria evaluation of suppliers based on the simulation of supply chain», en cours
- [RS01] **Patrick Pujo, Fouzia Ounnar, Yves Dubromelle**, «RFID uses for PROSIS ambient control», en cours

7. ACTIVITÉS D'ENSEIGNEMENT

Mes activités d'enseignement ont toujours été principalement réalisées dans le même établissement, une école d'ingénieurs qui a connu un changement de statut en 2001 (cf. tableau 4). Au début de ma carrière, j'y ai enseigné les matières de base de la construction mécanique, telle que le dessin industriel, la technologique de la construction, la mécanique générale, la résistance des matériaux et la fabrication assistée par ordinateur. Petit à petit, le panel de mes enseignements s'est enrichi de matières à la marge entre la mécanique et l'automatique, telles que la logique et les automatismes séquentiels, les capteurs et les actionneurs, ou à la marge de la mécanique et du génie industriel, comme la gestion de production assistée par ordinateur, la gestion des stocks, l'ordonnancement et le contrôle qualité.

C'est sur cette dernière orientation que se sont ensuite exclusivement focalisés mes enseignements, avec des thèmes relevant de l'ingénierie des systèmes de production, de l'organisation industrielle et de la productique... ainsi que sur les thèmes proches de mes activités de recherche, tels que les systèmes de pilotage des systèmes manufacturiers. Ainsi, j'ai eu la chance de pouvoir réintroduire dans mes enseignements des connaissances, méthodes et outils utilisés ou côtoyés tout au long de mes activités de recherche.

Période	Établissement	Statut
Depuis 2001	Département de Génie Industriel et d'Informatique de l'École Polytechnique Universitaire de Marseille (Polytech'Marseille – GII)	Maître de Conférences Classe Normale, puis Hors Classe
1988–2000	Institut Universitaire des Sciences Pour l'Ingénieur de Marseille (IUSPIM – Université d'Aix-Marseille III)	ATER, puis Professeur AGrégé, puis Maître de Conférences 1 ^{ère} classe

Tableau 4 : Statuts et établissements depuis 1988

Ces enseignements, que j'ai dû tous créer, se sont déroulés dans le cadre de Cours, Travaux Dirigés, Travaux Pratiques, Projets de Fin d'Études (PFE) et Projets de Réalisation Techniques (PRT), effectués principalement dans la filière de formation initiale de l'école d'ingénieur.

J'assure également (ou j'ai assuré dans le passé) des enseignements dans le cadre de Masters Professionnels et de DESS divers, associés ou non à mon établissement, ainsi que dans le cadre de formations d'ingénieur en alternance ou formation continue.

7.1. Description des Enseignements à Polytech'Marseille

Enseignements en cours en Productique

Gestion et Management de la Production (*gestion des stocks, prévisions industrielles, gestion de production, MRP, Planification, Calcul des Besoins Nets, lissage, ordonnancement, MES, JIT, kanban, OPT*).

[En charge de cet enseignement depuis 1998, intervention en cours magistral en quatrième année d'école d'ingénieurs, livret de transparents commentés (350 p), 5 études de cas rédigées, recueil d'exercices].

Gestion de la Qualité Totale et de l'Amélioration Continue (*gestion de la qualité, SPC, indicateurs, assurance qualité, référentiels, certification, qualité totale, approche processus, SMI*).

[En charge de cet enseignement depuis 1993, intervention en cours magistral en quatrième année d'école d'ingénieurs (promotion complète), livret de transparents commentés (250 p), 8 études de cas rédigées, recueil d'exercices].

Conception et Exploitation des Systèmes de Production (*équilibre, modélisation et simulation, implantation*).

[En charge de cet enseignement depuis 1998, intervention en cours magistral en quatrième année d'école d'ingénieurs (promotion complète), livret de transparents commentés (350 p), 9 études de cas rédigées, recueil d'exercices].

Lean 6 sigma et optimisation de la Production (*TPS, DMAIC, FIPOC, Takt Time, Hoshin, beijunka...*).

[En charge de cet enseignement depuis 2006, intervention en cours magistral en cinquième année d'école d'ingénieurs (promotion complète), livret de transparents commentés (250 p), 2 études de cas rédigées, recueil d'exercices].

Organisation et Technologie des Processus de Production (*Processus de sidérurgie, de fonderie et de forgeage*).

[En charge de cet enseignement depuis 2002, intervention en cours magistral en troisième année d'école d'ingénieurs (promotion complète), livret de transparents commentés (200 p), 3 études de cas rédigées, recueil d'exercices].

Enseignements passés en Mécatronique et en Génie Mécanique

Technologie des Systèmes Automatisés (*choix et dimensionnement des systèmes, capteurs et actionneurs*).

[1989-1999, intervention en cours magistral en troisième année d'école d'ingénieurs (promotion complète), polycopié (150 p), 5 études de cas rédigées, recueil d'exercices].

Technologie des Systèmes Mécatroniques (*capteurs intelligents, actionneurs intelligents, composants intelligents*).

[1996-1999, intervention en cours magistral en quatrième année d'école d'ingénieurs (option mécatronique), livret de transparents commentés (100 p), 3 études de cas rédigées].

FAO et Programmation CN (*Architecture des MOCN, programmation ISO et Gamme Automatique*).

[1996-1999, intervention en cours magistral en quatrième année d'école d'ingénieurs (option mécatronique), livret de transparents commentés (250 p), 1 étude de cas rédigée, recueil d'exercices].

Robotique industrielle (*Modélisation, comportements imparfaits des machines de production, Calibration, Métrologie*).

[1996-1999, intervention en cours magistral en quatrième année d'école d'ingénieurs (option mécatronique), polycopié (80 p), 2 études de cas rédigées].

Mécanique Générale, Analyse des Systèmes Articulés (*Statique, Cinématique, Dynamique, RDM*).

[1989-1998, intervention en cours magistral en troisième année d'école d'ingénieurs (promotion complète), polycopié (80 p), 2 études de cas rédigées, recueil d'exercices].

Technologie de la Construction Mécanique (*Dimensionnement des liaisons, Choix de composants technologiques*).

[1989-1998, intervention en cours magistral en troisième année d'école d'ingénieurs (promotion complète), polycopié (250 p), 8 études de cas rédigées, recueil d'exercices].

7.2. Description des Enseignements hors Polytech'Marseille

Enseignements actuels

Management par la Qualité

[2004-2009, intervention en cours magistral et TD en Master Pro 2 SIS (promotion complète)].

Introduction à la Qualité

[2007, intervention en cours magistral en Licence professionnelle CSSA]

Coordination, Ordonnancement et Pilotage en BTP

[Depuis 2001, intervention en cours magistral et TD en DESS IPB, puis en Master Pro IPB]

Gestion de Projet [Master Pro SIS]

[2007-2009, intervention en TD en Master Pro 2 SIS (promotion complète)].

Enseignements passés

Analyse et Gestion de la Qualité

[1994-1998, intervention en cours magistral en DESS MAQUASIR, FST St Jérôme, Marseille]

Mécanique Générale

[1989-1995, intervention en cours magistral et TD en DEUG A, FST St Jérôme, Marseille]

Technologie des Systèmes Automatisés et Instrumentés

[1990-1998, intervention en cours magistral en DESS ITCI, FST St Jérôme, Marseille]

Enseignements passés 'hors formation initiale'

Industrialisation : Procédés d'Obtention des Préformes (*Formage, Fonderie, Plasturgie, Prototypage, Découpage, Emboutissage...*)

[2003&2005, intervention en cours magistral et TD en UV B2, CNAM Aix en Provence]

Formation continue.

Industrialisation et Procédés d'Obtention des Préformes (*Lecture de plans, gamme d'usinage, étude de phase, industrialisation, Formage, Fonderie, Plasturgie, Prototypage, Découpage, Emboutissage...*)

[2002-2005, intervention en cours magistral, TD et TP en MPA, CFAI 84]

Formation par alternance.

7.3. Encadrements pédagogiques

Une partie très importante et originale de la formation dispensée au Département «Génie Industriel et Informatique» de Polytech'Marseille concerne la réalisation de projets par des équipes de cinq à six étudiants encadrés par des enseignants tuteurs : les PRT et les PFE.

Les Projets de Réalisation Technique (PRT) concernent les élèves ingénieurs de deuxième année sur une période de 8 mois (d'octobre à mai) et peuvent être éventuellement en collaboration avec un laboratoire universitaire ou une entreprise. Ils ont pour objet de permettre aux élèves ingénieurs de mener à bien un projet devant aboutir obligatoirement par la fourniture d'une réalisation matérielle et/ou logicielle qui fonctionne et par la fourniture de documents (dossier de synthèse et dossier technique) tout en effectuant leur apprentissage du travail en équipe.

Les Projets de Fin d'Étude (PFE) concernent les élèves ingénieurs de troisième année sur une période de cinq mois (de septembre à janvier) et doivent être obligatoirement réalisés en collaboration avec une entreprise. Ils ont pour objet de permettre aux élèves ingénieurs de réaliser un projet industriel d'étude de faisabilité, de mise en œuvre d'une démarche qualité, d'industrialisation... et devant aboutir à la fourniture de documents (dossier de synthèse, dossier technique et dossier de gestion de projet) tout en apprenant à s'organiser en équipe, à planifier leur travail et à réaliser une gestion de projet et une gestion de qualité. Certains de ces projets permettent de mener des actions de transfert de technologies.

Période	Titre du projet	Type	Collaboration
2009/10	Mise en œuvre du système de transitique Montrac	PRT DGII/EPUM	LSIS
2008/09	Intégration de HLA dans un HMES isoarchique	PRT DGII/EPUM	LSIS
2007/08	Réalisation d'un HMES isoarchique	PRT DGII/EPUM	LSIS
2003/04	Réalisation d'un démonstrateur d'EPA pour parking robotisé	PRT DGII/EPUM	LSIS
2002/03	Réalisation d'une maquette de système de pilotage auto organisé pour un Hub fer/fer entièrement robotisé	PRT DGII/EPUM	LSIS
2001/02	Étude et réalisation d'un système de pilotage décentralisé	PRT DGII/EPUM	LSIS
2000/01	Réalisation d'un robot mobile pédagogique : suivi d'une cible mobile via acquisition vidéo	PRT IUSPIM	IUSPIM
	Étude et dimensionnement d'une usine pédagogique	PFE DGII/EPUM	IUSPIM
1999/00	Réalisation d'un robot mobile pédagogique : mise au point des primitives de suivi de trajectoires	PRT IUSPIM	IUSPIM

1998/99	Réalisation d'un robot mobile pédagogique : mise en place de l'architecture matérielle	PRT IUSPIM	IUSPIM
1997/98	Étude et dimensionnement d'une usine pédagogique	PFE IUSPIM	IUSPIM
1996/97	Mise en place d'une démarche Qualité Totale dans le cadre de 'Qualispim'	PFE IUSPIM	IUSPIM
1995/96	Réalisation du système de commande d'un tour CN à base d'une carte PMAC Lite	PRT IUSPIM	IUSPIM
	Réalisation du système de programmation de tâche pour tour CN	PRT IUSPIM	IUSPIM
	Mise en place d'une démarche Assurance Qualité 'Qualispim'	PFE IUSPIM	IUSPIM
1994/95	Étude de faisabilité d'une interface d'acquisition de mesures métrologiques sous Windows	PFE IUSPIM	DIAM-IUSPIM
1993/94	Réalisation du simulateur graphique d'une cellule de tournage flexible SiCAT	PFE IUSPIM	LAIM
	Réalisation d'un superviseur graphique pour le système de transport ESAFLEX	PFE IUSPIM	LAIM
	Réalisation d'un progiciel de calcul des déformations élastiques des liaisons 'Pivot' à roulements à billes	PRT IUSPIM	LAIM
	Réalisation d'une bibliothèque de fonction pour la métrologie tridimensionnelle	PRT IUSPIM	LAIM
1992/93	Mise en œuvre d'algorithmes pour l'interface graphique HyperGantt	PFE IUSPIM	Jean Paul Kieffer - LAIM
1991/92	Réalisation d'un logiciel de simulation technologique de robot industriel	PFE IUSPIM	LAIM
	Réalisation d'un logiciel d'aide à l'implantation d'atelier de production, sous Autocad	PFE IUSPIM	Jean Paul Kieffer - LAIM
1990/91	Réalisation de l'interface graphique du logiciel d'ordonnancement MétaGantt	PFE IUSPIM	Jean Paul Kieffer - LAIM
	Étude et réalisation du système de commande décentralisé d'un tour CN à base de cartes d'axe	Projet DESS MAQUASIR	Jean Michel Olive - LAIM

Tableau 5 : Projets pédagogiques depuis 1990

8. ADMINISTRATION ET ORGANISATION DES ACTIVITÉS PÉDAGOGIQUES

8.1. Responsabilités diverses à GII

Animateur de la Commission Pédagogique ‘Génie Industriel’

En 2002, une profonde réflexion pédagogique sur les programmes de formation correspondant à un profil d'ingénieur en Génie Industriel et Informatique a été lancée, en s'appuyant sur le travail de trois commissions pédagogiques : en Automatique, en Informatique et en Génie Industriel. Depuis, j'assure l'animation de la commission Génie Industriel qui, avec la participation des collègues concernés, définit, suit et ajuste les enseignements de Génie Industriel en termes de Cours, TD, TP, ..., pour l'ensemble des 3 années de la formation au GII.

Le dernier axe de cette mission concerne l'observation du domaine et l'introduction de nouveaux enseignements pour répondre aux besoins des industriels. Ainsi, nous avons introduit dans le programme des enseignements sur la conduite du changement et la culture d'entreprise, sur la modélisation d'entreprise, sur les ERP, sur la sécurité industrielle et sur la production lean.

Responsable des Études 3^{ème} année GII

2003-2008 : responsable des études de 3^{ème} année du département Génie Industriel et Informatique de Polytech'Marseille. Cette mission consistait à la mise en œuvre des décisions des commissions pédagogiques, la recherche d'intervenants extérieurs, l'élaboration des emplois du temps en fonction des différentes contraintes des dispositifs pédagogiques et des collègues, le suivi des élèves, l'adaptation de l'emploi du temps en fonction des demandes de modifications des enseignants...

Responsable de la Pédagogie par Projets

La formation d'ingénieurs en Génie Industriel et Informatique s'appuie fortement sur une palette de dispositifs pédagogiques de type projets réalisés en équipe : les Projets de Fin d'Études (PFE), les Projets de Réalisation Technique (PRT), les microprojets et les auto-apprentissages.

Les Projets de Fin d'Études sont des projets de 5^{ème} année qui se déroulent sur 5 mois dans les murs de l'école, avec quelques interventions en entreprise. Ils portent exclusivement sur des problématiques industrielles d'organisation et/ou de management. La mission confiée aux élèves est une mission conventionnée d'exploration et débouche sur un mémoire dont la mise en œuvre reste de la responsabilité de l'entreprise. Les élèves sont évalués sur leur capacité à atteindre une solution efficace face à une difficulté réelle et concrète : on est hors de l'exercice purement pédagogique.

Les Projets de Réalisation Technique sont des projets de 4^{ème} année portant exclusivement sur des problématiques techniques et pratiques, à dominante automatique ou informatique. Certains PRT se déroulent en relation avec des entreprises, d'autres sont en liaison avec des travaux de transfert recherche-industrie, voire même des travaux d'ingénierie de recherche commandités par le LSIS, et enfin les derniers se rapportent à des développements de maquettes pédagogiques.

Les microprojets visent essentiellement à développer la réactivité de nos élèves, qui disposent d'une semaine complète pour élaborer une réponse d'équipe à un problème technique ou scientifique posé par un enseignant, le plus souvent sous la forme d'une étude de cas. Ce travail donne lieu à la production d'un rapport et est soutenu devant l'enseignant ayant proposé le sujet.

Les auto-apprentissages sont un travail bibliographique effectué par équipe, donnant lieu à la production d'un rapport écrit et à la réalisation d'une soutenance effectuée devant le reste de la promotion en fin de semestre. Nous considérons que la formation à l'auto apprentissage est fondamental pour un profil d'ingénieur actuel, où la production de nouvelles connaissances est continue : nous voulons que nos ingénieurs gardent le réflexe de continuer à s'auto former.

Je suis donc en charge de la coordination et de l'animation de ces dispositifs depuis 2003 (depuis 1998 pour les PFE). Ceci inclut la recherche des sujets relatifs à ces dispositifs pédagogiques, l'affectation des sujets aux collègues qui assurent le tutorat de ces projets, le suivi du bon déroulement des projets et l'organisation de l'évaluation du travail fourni. Tout ceci a fait l'objet d'une démarche Qualité orientée processus et planifiée annuellement.

Responsable des Relations Industrielles

Depuis 2002, je suis en charge du service des Relations Industrielles du département GII. Cette activité était auparavant liée au fonctionnement des stages de fin d'études et était réduite à ce périmètre. Ceci engendrait un fonctionnement épisodique centré sur le contact direct avec des tuteurs récurrents, sans liens profonds et plus institutionnalisés avec les entreprises, et finalement avec peu de retours sur le département GII. Mon action a consisté à déployer une stratégie de communication avec le niveau 'corporate' des principales entreprises avec lesquelles nous travaillons (en établissant des bilans {stages, projets, emplois} permettant de synthétiser l'état des relations entre ces entreprises et le département GII) et avec différents organismes (tels que la DRIRE, l'ANVAR, l'Union patronale de la métallurgie, le conseil régional PACA), ou certaines officines de transfert de technologies, comme Méditerranée Technologies, ou encore des incubateurs d'entreprises. Ceci nous a permis d'obtenir plus de sujets de stage et de projets, et plus d'offres d'emploi. Depuis 4 ans, nous avons un taux d'embauche (CDI, CDD), au jour de la soutenance de stage (fin juin), de 60% des élèves n'envisageant pas une poursuite d'études en 3^{ème} cycle.

Parallèlement, j'ai consolidé toutes les données relatives aux relations industrielles passées du département GII, en recensant dans un SGBD toutes les activités de stages et de projets pédagogiques ayant eu une interaction avec le monde socio économique. Ce fichier fait le lien avec les élèves concernés et leur devenir, lorsqu'il est connu. Ceci a permis de créer de nouveaux contacts avec de nouvelles entreprises et d'améliorer le réseau de relations industrielles du département GII.

A ces actions s'est rajoutée en 2008 la charge de la collecte de la Taxe d'Apprentissage spécifique à GII. Sur ce dernier point, les collectes précédentes étaient descendues à un niveau insignifiant. Mes résultats en un an montrent une progression supérieure à 700%.

8.2. Chargé de mission 'Relations avec les Entreprises' à Polytech'Marseille

Courant 2006, ma fonction a été étendue à l'ensemble des 3 départements de Polytech'Marseille. Il s'agit d'une part s'assurer la liaison avec le Réseau Polytech en termes de Relations Industrielles et d'autre part de monter un service commun à partir des pratiques disparates des 3 départements de Polytech'Marseille. Différentes actions ont été engagées pour cela. Je citerais :

- action stage : homogénéisation des conventions, mise en place d'un SGBD commun,
- action charte : mise en place d'un club d'entreprises partenaires, développement de la culture partenariale,
- action communication : conception de plaquettes, recueil de témoignages de carrières,

- action taxe d'apprentissage : mise en place d'une base de données, conception d'une plaquette pour la collecte de taxe d'apprentissage, mise en place d'un processus de suivi de la collecte.
Sur ce dernier point, une progression de 33% en un an et de 100% depuis 2006 ont été observées.

8.3. Responsabilité des Activités Alternatives à l'IUSPIM

Responsabilité des Activités Alternatives de l'IUSPIM : de 1991 à 1998

Les Activités Alternatives de l'IUSPIM étaient des activités extra scolaires, réalisées sur une période d'une année, non encadrées par des enseignants, au travers desquelles les élèves ingénieurs devaient montrer leur aptitude à conduire un projet individuel ou collectif visant à renforcer le fonctionnement ou l'image de marque de l'école (Téléthon, soutien scolaire, compétition sportive, organisation de sorties ludiques et culturelles, salons étudiant, organisation du palmarès, fêtes de la Science, course de l'ESSEC, course Marseille-Cassis, démarche Qualité, présentation de l'école dans les filières Bac+2...).

L'objectif était multiple : développer chez les futurs ingénieurs une capacité de travail autonome en rapport avec les exigences de la vie des ingénieurs dans le monde industriel, améliorer la capacité de communication tant écrite qu'orale (relationnel), sans laquelle le savoir-faire ne saurait être valorisé, valoriser des initiatives individuelles et/ou collectives conduisant à un épanouissement des qualités humaines de nos élèves et à un plus grand rayonnement de l'école.

Cela correspondait à la gestion administrative d'environ 280 dossiers par an (entre 250 et 300 selon les années), chaque dossier faisant préalablement l'objet d'une discussion individuelle suivie de l'établissement d'un contrat, du suivi régulier de l'avancement de l'activité (en particulier lorsqu'il y avait des engagements financiers ou lorsque l'image de l'école était particulièrement en jeu...), puis, après remise des rapports par les élèves, de l'organisation de l'évaluation des travaux effectués, avec un jury où participait l'ensemble des collègues enseignants-chercheurs de l'école. Cette évaluation du travail fourni, très difficile, car hors du contexte normal de la scolarité, était basée sur l'appréciation de la capacité de nos élèves à gérer des responsabilités (c'est-à-dire par induction à être un professionnel), à être capables de se dépasser pour arriver à réaliser ce à quoi ils se sont engagés, et ceci sans oublier la capacité à communiquer pour mettre en valeur leur résultat.

8.4. Participation au Projet GEM (Global Education in Manufacturing)

Contexte international du projet GEM

Dans le cadre de l'initiative IMS (Intelligent Manufacturing System) conduite au niveau mondial par un ensemble de partenaires universitaires, industriels et institutionnels, il s'est posé le problème de la retombée de l'évolution des modes de gestion et de management des activités de production manufacturière sur les systèmes de formation initiales et professionnelles. Cette problématique s'est traduite par la mise en œuvre du projet GEM (Global Education in Manufacturing), conduit également à l'échelle mondiale, avec la participation de l'Europe, des Etats-Unis, du Japon, de la Corée, de l'Australie (au total, 29 participants de 20 pays). Le travail a été réparti en sous projet indépendant, dont l'un, GEM Europe, est sponsorisé par l'union européenne. Polytech'Marseille, par l'intermédiaire de son département Génie Industriel et Informatique, représente la contribution française à ce projet.

Objectifs du projet GEM

Pour concevoir le cursus d'une formation en «manufacturing» répondant aux besoins futurs des entreprises, une méthodologie en 4 étapes a été définie :

- définir et comprendre les besoins des industriels dans le cadre de la formation et de l'enseignement au niveau 'manufacturing strategy',
- cerner l'évolution du concept de 'production manufacturière', prise au sens large dans le contexte moderne dans lequel se situent les entreprises : prise en compte du cycle de vie du produit et des services qu'il rend, analyse des retombées sociales et environnementales de la fabrication du produit et de son utilisation...
- proposer un programme de formation d'ingénieurs : développement d'un nouveau cursus englobant «manufacturing technology» et «manufacturing business».
- intégrer les technologies modernes de l'information et des communications dans les techniques pédagogiques, qui doivent indifféremment s'adapter à de la formation initiale ou professionnelle.

Contribution de Polytech'Marseille au projet GEM

Polytech'Marseille, en tant qu'agent associé au projet GEM, a eu un rôle de sous traitance pour un certain nombre de tâches réalisées ou coordonnées par les 6 partenaires principaux. Parmi ces tâches, citons :

- T1.1 Best industry practices (Identification auprès de partenaires industriels des pratiques actuelles vis-à-vis de l'entreprise numérisée du futur),
- T1.2 Survey of existing curricula (Identification des formations françaises en Manufacturing)
- T1.3 Training and education needs (Diffusion et analyse d'une enquête d'identification des besoins industriels en formation dans le domaine du 'manufacturing strategy' à plus de 400 entreprises),
- T4.2 Demonstrator evaluation (Tests de différentes maquettes de cours, dispensés en e-learning, par des évaluateurs universitaires et industriels),
- T6.2 Dissemination activities (Présentation du projet GEM dans 3 colloques francophones (GRP 2002, GDR MACS STP 2004, CETSIS'2005), organisation d'une journée de diffusion industrielle).

8.5. Responsabilité du Projet P³ (Plateforme Polyvalente de Production)

Le département GII, en collaboration avec l'équipe SEDIP du LSIS, met en place une plateforme polyvalente de production. Cet outil à vocation recherche et pédagogie reproduit toutes les fonctionnalités d'une usine de production manufacturière moderne. Il permet d'investiguer toutes les problématiques émergentes dans le domaine et relatives aux modes émergents de pilotage des systèmes de production. Cette usine est articulée autour d'un système de production intégrant toutes les technologies actuelles (transitique, robotique, transstockeur, traçabilité RFID...) associé à un système de management intégré de type ERP (Enterprise Resource Planning). Le système de production est organisé autour d'un système de transitique Montrac Chaos permettant de gérer automatiquement et de manière flexible tous les flux de produits et tous les modes de gestion de production possibles. L'usine est conçue pour produire des petits objets. Pour cela, 11 postes de travail sont repartis autour des 3 boucles de transport et desservis par les navettes automotrices Montrac. Cela donne :

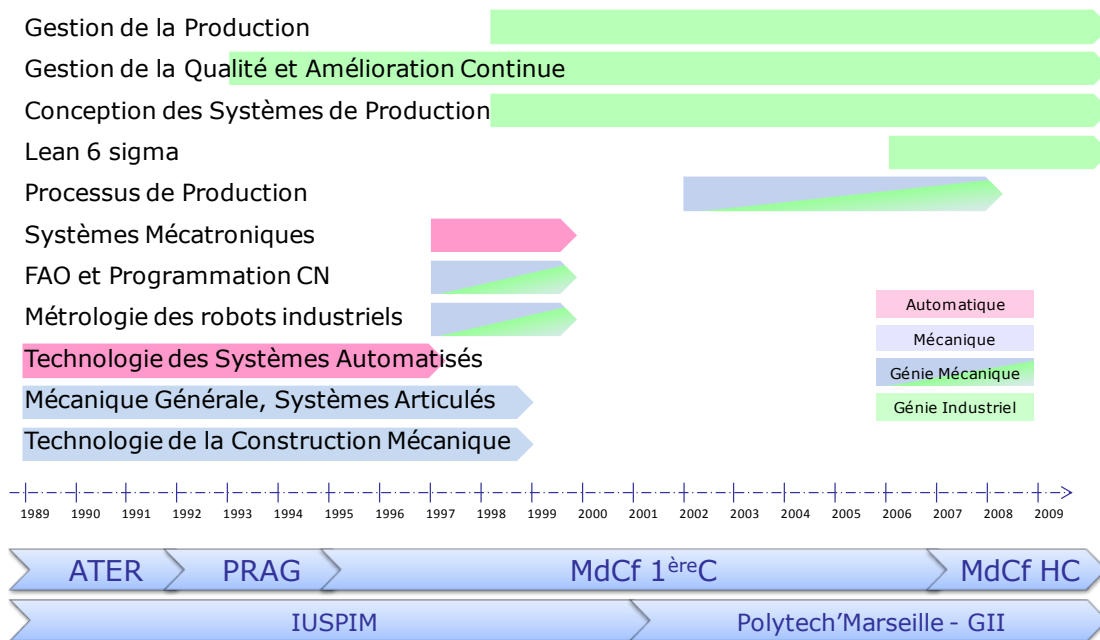
- 9 postes polyvalents, équipés de coupleurs RFID ;
- 1 poste d'entrée sortie (entrée des matières brutes et sorties des produits finis) ;
- 2 robots scara de chargement déchargement des navettes ;
- 1 transstockeur robotisé (M) placé au milieu de la boucle centrale.

Toutes les opérations de production font l'objet d'un suivi précis obtenu par lecture de tags RFID fixés sur les produits et les conteneurs circulant entre les différents postes de travail. L'ERP choisi pour supporter le système d'information et de management est Sage X3. Une salle dédiée à cet ERP est adossée à l'atelier.

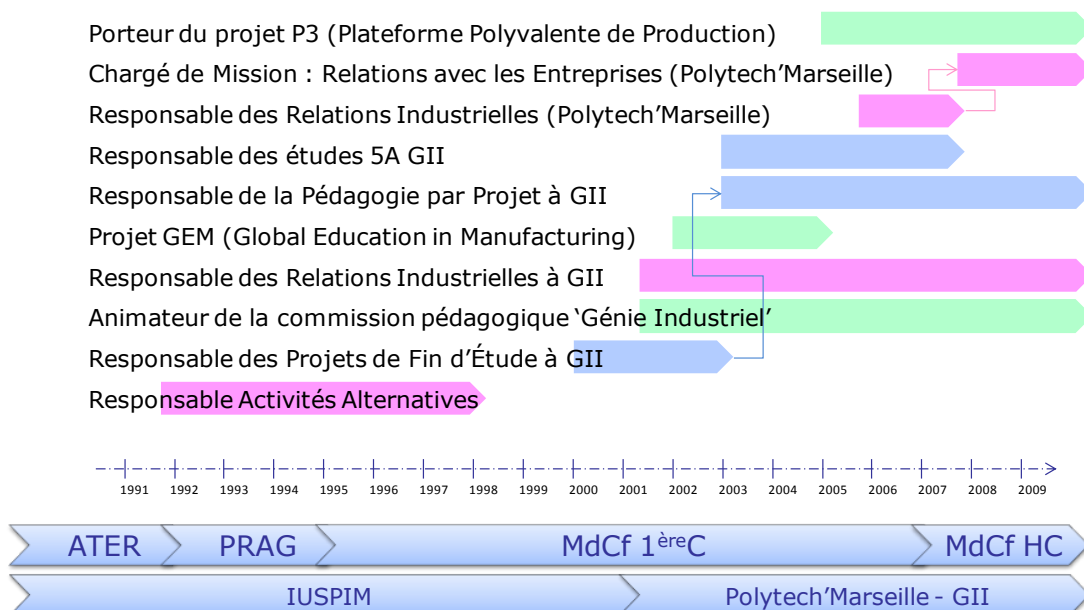
J'assume la responsabilité de ce projet, autant pour les aspects pédagogiques que recherche. Ce projet est supporté à hauteur de 50% par le département GII.

9. SYNTHÈSE DES ACTIVITÉS

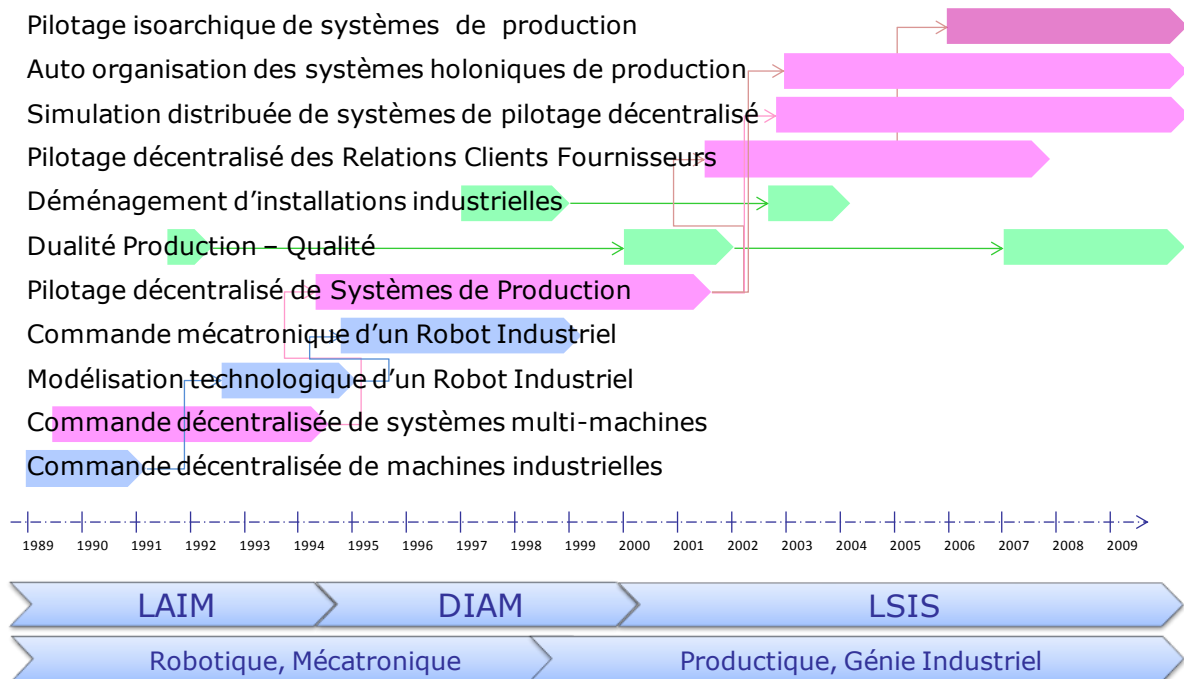
Synthèse de mes activités d'enseignement



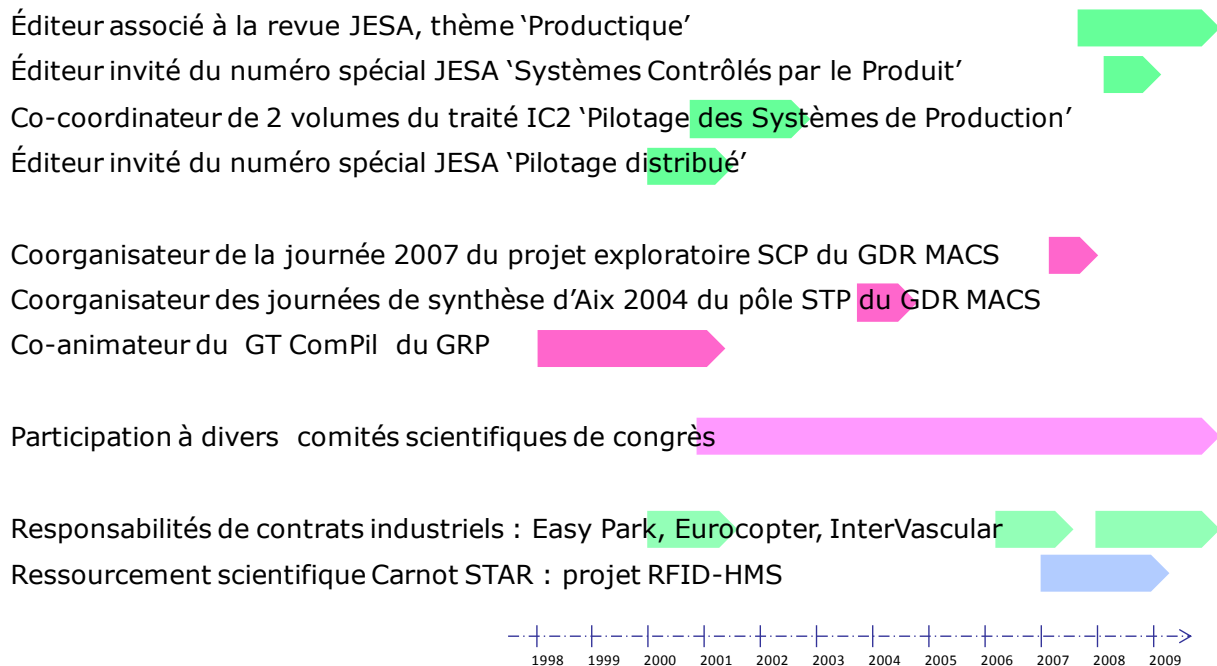
Synthèse des activités administratives liées aux enseignements



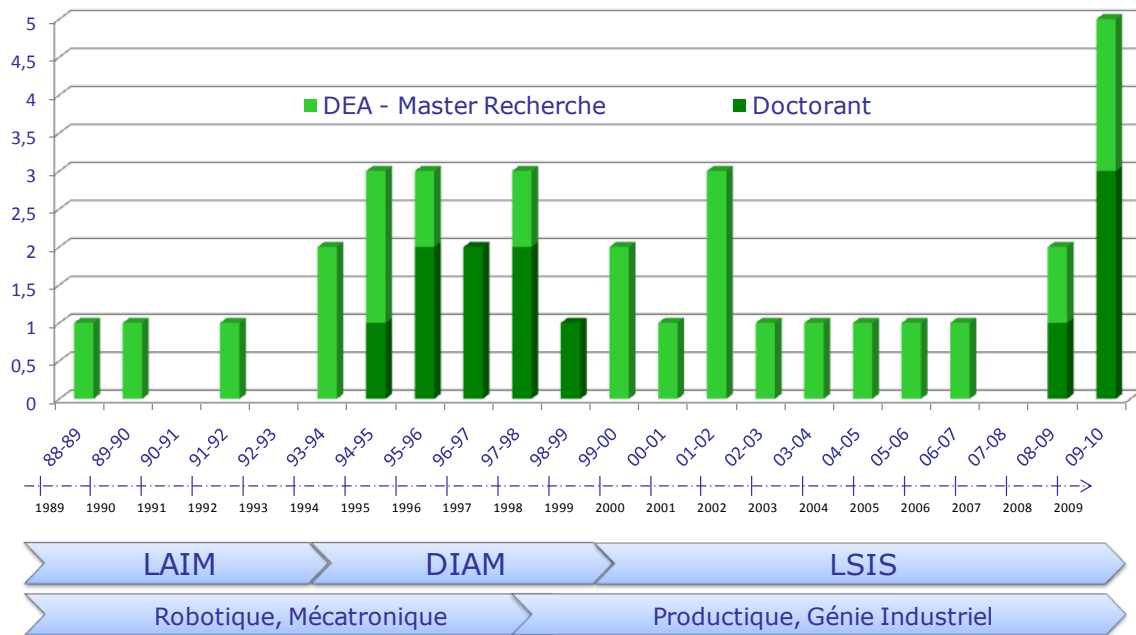
Synthèse des Activités de Recherche (thématiques)



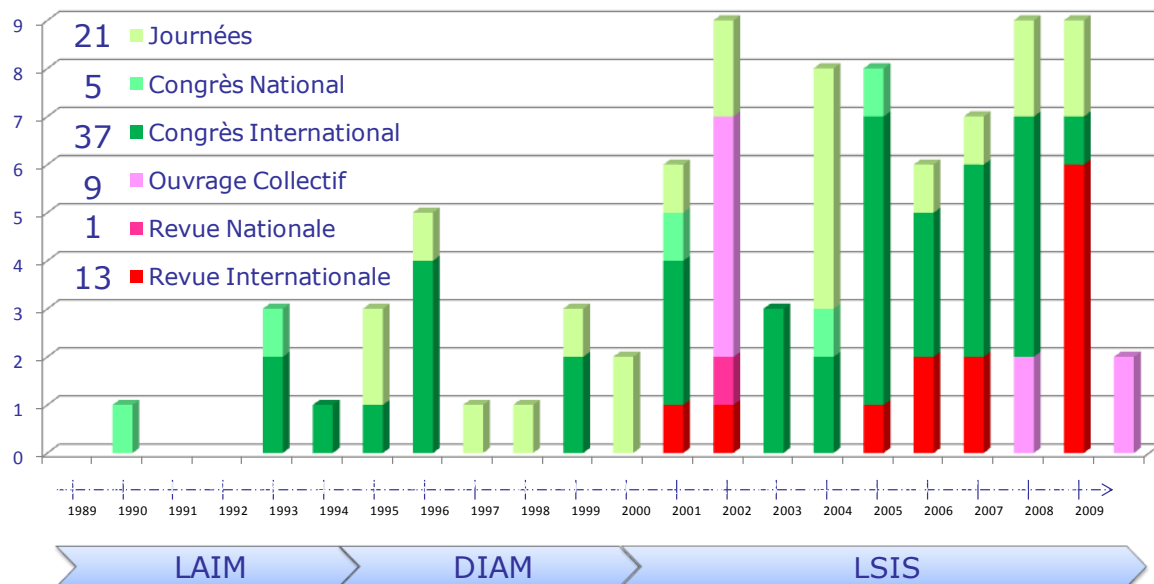
Synthèse des activités d'animation de la Recherche



Synthèse des activités d'encadrement de jeunes chercheurs



Synthèse des activités de diffusion de mes Recherches



SYNTHÈSE SCIENTIFIQUE

TABLE DES MATIÈRES

1.	Pilotage des Systèmes de Production Manufacturière	60
1.1.	Concept de Pilotage pour la production manufacturière	60
1.2.	Systèmes de Pilotage pour Systèmes de Production.....	65
1.3.	Systèmes de Pilotage hétérarchiques	69
1.4.	Systèmes manufacturiers intelligents.....	73
1.5.	Systèmes holoniques manufacturiers	81
2.	Proposition d'une Architecture Isoarchique pour le Pilotage des Systèmes de Production.....	112
2.1.	Contexte des recherches présentées ici	112
2.2.	Concept d'Isoarchie.....	120
2.3.	Modélisation d'un Système de Pilotage Isoarchique.....	125
2.4.	Proposition d'une architecture isoarchique : PROSIS	129
2.5.	Le soutien aux holons : l'EPA.....	133
2.6.	Modélisation DEVS de l'émergence par l'interaction inter-holonique.....	139
2.7.	Modélisation de l'émergence par le compromis inter holonique	147
2.8.	Mise en perspective des holons, de l'EPA et des services associés	152
3.	Mise en Œuvre de PROSIS	153
3.1.	Pilotage isoarchique d'une cellule de tournage automatisée flexible	153
3.2.	Pilotage isoarchique d'un Hub de triage fer-fer robotisé.....	161
3.3.	Pilotage isoarchique d'une flotte de robots mobiles.....	168
3.4.	Pilotage isoarchique d'un réseau partenarial logistique	173
3.5.	Pilotage isoarchique d'un <i>Job Shop</i> en flux tiré	182
4.	Conclusion et Perspectives	189
4.1.	Développement des systèmes de pilotage isoarchique.....	189
4.2.	Finalisation du déploiement de PROSIS	190
4.3.	Optimisation et pro-activité via PROSIS.....	194
5.	Références	200

1. PILOTAGE DES SYSTÈMES DE PRODUCTION MANUFACTURIÈRE

Les Systèmes de Production Manufacturière sont généralement considérés comme des systèmes complexes, au sens où ils sont composés d'éléments en interactions, et que ces interactions sont difficilement appréhendables, soit du fait de leur nombre, soit du fait de leur composition, soit du fait de leur manque de clarté, en particulier lorsque des intérêts apparemment contradictoires sont en compétition pour privilégier une solution de fonctionnement... Car ces systèmes ont besoin d'être dirigés, c'est-à-dire du point de vue de l'Automatique, ils doivent recevoir des consignes pertinentes pour atteindre un objectif donné, malgré l'apparition de perturbations et autres événements contingents. La manière d'élaborer ces consignes, c'est-à-dire le pilotage, constitue le fond même de la contribution scientifique que nous présentons dans ce mémoire. Il se trouve que dans la plupart des cas, le grand nombre d'interactions et leur complexité intrinsèque fait que ce problème d'élaboration de consignes ne peut être traité par des méthodes calculatoires propres à être automatisées, et il faut recourir à l'expertise d'un pilote humain pour décider de la solution adéquate. Il en résulte souvent que les Systèmes de Production ne fonctionnent pas de manière optimale. De nombreux domaines scientifiques abordent ce problème, avec leurs propres outils, modèles et méthodes, avec l'objectif d'une complète automatisation ou celui d'une aide à la décision pour le pilote. Pour mémoire, nous pouvons citer la Robotique, la Recherche Opérationnelle, l'Intelligence Artificielle ou encore la Gestion... En temps que producticiens, nous avons abordé ce problème en intégrant la nécessaire interdisciplinarité propre à toute recherche relevant du champ général de la Cybernétique (Wiener 1958). Aussi, après avoir dans un premier temps posé les concepts généraux définissant notre champ de recherche sur les systèmes de pilotage, nous présenterons les aspects relatifs à leur architecture et ceux relatifs à la prise de décision.

1.1. Concept de Pilotage pour la production manufacturière

Les définitions du pilotage rencontrées dans la littérature sont variées et parfois contradictoires. C'est pourquoi nous nous efforcerons dans un premier temps de clarifier les concepts utilisés. Pour ce faire, nous pouvons nous reporter tout d'abord aux définitions données par les encyclopédies. Ainsi par exemple, selon le « Grand Robert de la Langue Française », de même que selon le « Dictionnaire Encyclopédique Hachette », piloter réfère à conduire, diriger, gouverner, guider. Toutefois, ces termes ne sont pas synonymes : la notion de pilotage rajoute à celle de conduite les notions de difficulté, de contingence et de réaction. Ces nuances, par ailleurs essentielles, se retrouvent dans le langage usuel : ne dit-on pas conduire un véhicule usuel et piloter une voiture de course, conduire un train ou un bus, mais piloter un avion, ou encore, dans un domaine plus proche du domaine manufacturier, conduire un projet industriel et piloter un changement organisationnel ?

La notion de piloter est apparue en 1483 pour la manœuvre des embarcations. Le mot « pilotage » est défini en 1611 comme l'action ou l'art de diriger un navire dans un port, et cet usage subsiste aujourd'hui. Avec la naissance de l'aviation, l'usage du terme est associé à l'action ou l'art de diriger un aéronef. Plus récemment, les années 60 ont vu une apparition simultanée de ce terme dans les domaines scientifiques du contrôle de gestion et de la théorie des systèmes, ceci afin de désigner l'action ou l'art de diriger une entreprise.

En termes d'organisation, les principes de mise en œuvre des tâches de management d'un système de production relèvent de l'exercice du pouvoir de partitionnement et de déclenchement des tâches de production. En effet, il est d'usage de parler de « pilotage d'une organisation » pour désigner l'ensemble des tâches accomplies par l'entité décisionnelle dirigeant cette organisation et permettant d'assurer la cohérence de son fonctionnement. A ce titre, le pilotage consiste à prendre toutes les décisions utiles à ce fonctionnement, lequel doit correspondre à un objectif clairement défini. Cela implique d'utiliser de manière opportune les ressources constituant l'organisation, et en subissant un certain nombre de contraintes d'origines diverses.

Ainsi, le pilotage des systèmes de production revêt une importance de plus en plus grande. Les évolutions récentes de la compétition industrielle rendent les conditions d'exploitation des systèmes de production de plus en plus contraignantes et ceci dans un environnement de plus en plus incertain. Cela induit la nécessité de « piloter » ces systèmes dans une recherche permanente de performance face aux multiples aléas qui peuvent survenir.

Nous commencerons donc par positionner l'importance du pilotage dans ce contexte de complexité dû à la

multiplicité des contraintes à respecter et à la pluralité des objectifs à poursuivre. Les principaux concepts relatifs au pilotage seront ensuite précisés. Nous verrons ainsi qu'en raison même de sa complexité, le sujet peut être abordé selon de multiples points de vue, constituant ainsi autant de facettes. Enfin, nous aborderons la notion plus générale de système de pilotage.

- **Contexte et objectifs du pilotage des systèmes de production**

Pour prendre les décisions nécessaires, l'opérateur de pilotage doit disposer d'un maximum d'informations permettant d'éclairer la situation effective de l'organisation du système de production. Toutefois, la complexité des choix à effectuer et la contingence des situations à traiter ne permettent pas de ramener le problème de décision sous une formalisation amenant à une solution unique et optimale. Au contraire, la performance d'une décision en pilotage peut le plus souvent s'évaluer selon différents points de vue antagonistes : il s'agit plutôt de trouver la moins mauvaise des solutions au regard d'un ensemble de critères.

Dans ce contexte, l'utilisation d'outils et de méthodes rationnelles d'aide à la décision apporte des propositions de solutions, mais reste forcément limitée et c'est pourquoi l'intuition et la subjectivité de l'opérateur de pilotage entrent fréquemment en ligne de compte dans la prise de décision.

Les mécanismes de prise de décision existent à tous les niveaux de responsabilité dans l'entreprise.

Aux niveaux hiérarchiques les plus hauts, le pilotage est stratégique ou tactique et sous-entend des horizons temporels d'influence sur le comportement du système de production à long ou moyen termes. Les objectifs à ces niveaux se déclinent en termes de profit (rentabilité des capitaux investis), de positionnement sur le marché (part de marché, volume de vente, qualité de produit, position dominante, politique de prix, taux d'expansion...), de productivité (augmentation du taux de production par ouvrier, par vendeur, par employé), de finances (cash flow, structure du capital...), d'innovation (nouveaux produits, R&D...), bref essentiellement en termes économiques.

Au niveau de l'atelier, le pilotage se veut opérationnel, c'est-à-dire qu'il doit indiquer de manière très concrète les actions à conduire à court terme, voire même en temps réel, pour pouvoir obtenir un fonctionnement efficace et efficient du Système de Production. Il s'agit alors d'indiquer, à l'image de l'Hexamètre de QUINTILIEN, QUI fait QUOI, QUAND, OÙ, COMMENT et POURQUOI, en respectant d'une part les contraintes définies aux niveaux décisionnels supérieurs et d'autre part celles inhérentes au système de production et à son environnement. Dans la quasi-totalité des cas, le QUI est associé au OÙ (l'organisation des ressources sous-tend leur localisation) et le COMMENT et le POURQUOI sont prédéfinis pour chaque QUOI (lors des phases de préparation du travail ou d'industrialisation). L'organisation du travail nécessite alors de définir un sous-ensemble du produit cartésien $\{\text{QUOI}\} \times \{\text{OÙ}\} \times \{\text{QUAND}\}$ pour l'ensemble des tâches à réaliser (Giard 1988). Lorsque cette activité d'organisation est menée de manière préparatoire, hors ligne, il s'agit alors de prévoir de manière fine le pilotage de l'atelier, ce qui donne lieu à la création d'un ordonnancement. Lors de la mise en œuvre effective des tâches dans l'atelier apparaissent ensuite des événements contingents qui viennent perturber le plan initial. Le rôle du pilotage est alors de trouver en ligne une solution permettant à l'atelier de continuer à fonctionner en conservant des performances acceptables. Généralement, les responsables d'entreprise recherchent une *productivité* maximale, c'est-à-dire un rendement maximal s'exprimant comme le rapport entre la valeur économique des produits sortants, rapportée aux coûts cumulés des approvisionnements nécessaires et des activités de production. L'augmentation constante de ces coûts renforce la nécessité d'en optimiser l'utilisation.

De nouvelles considérations sont venues progressivement se rajouter à cet impératif de productivité.

Tout d'abord, la nécessité de fabriquer des produits de plus en plus sophistiqués, toujours plus rapidement, en respectant des normes de qualité, de fiabilité et de précision de plus en plus strictes a abouti, depuis la seconde guerre mondiale, à une généralisation des systèmes d'assurance-qualité servant de cadre général au fonctionnement des entreprises, et donc à leur pilotage.

Ensuite, la flexibilité de la production est devenue une préoccupation importante, pour deux raisons essentiellement. Premièrement, la mécanisation et l'automatisation remplacent la main d'œuvre par des machines, fondamentalement moins adaptables que les hommes. Deuxièmement, l'évolution du contexte économique nécessite de s'adapter de plus en plus souvent à des modifications de la demande de la clientèle. Ainsi, la flexibilité caractérise la capacité d'un système industriel à créer et à gérer la variété, de façon économique et continue, afin de

s'adapter à ces changements de l'environnement tout en maintenant son équilibre (Okongwu 1990). Ceci signifie la capacité à changer rapidement de type de pièces produites, à supporter simultanément différents types de pièces, à changer le parcours des objets dans le système de production (leur flux), à produire de nouveaux types de pièces ou à adapter l'activité productive au volume réel de la production et au contexte de cette dernière, en résumé, autant de nouvelles contraintes à prendre en considération lors du pilotage.

Enfin, la recherche d'une performance de réactivité aux perturbations est devenue fondamentale. En effet, les modifications fréquentes de la demande commerciale, les aléas éventuels d'approvisionnement et les défaillances de machines sophistiquées voient leur impact augmenter d'autant plus que l'engouement pour le juste-à-temps entraîne la diminution drastique de stocks qui jusque là constituaient un moyen efficace d'absorption des aléas. La réactivité d'un système de production se définit en termes de promptitude à réagir face à un changement du plan de charge, qu'il soit prévisionnel ou actuel : plus le temps de réponse sera court, plus le système sera réactif, c'est-à-dire apte à réagir rapidement face à de nouvelles contraintes. Cette réactivité, devenue un enjeu économique incontournable, se traduit par la dynamique avec laquelle le pilotage permet de s'adapter aux perturbations.

Il résulte de cela que le pilotage des systèmes de production se complique singulièrement par cette superposition de ces impératifs multiples.

• Définitions et concepts relatifs au pilotage des systèmes de production

Ce paragraphe a comme objectif de définir les termes utilisés dans ce mémoire. La présentation sera effectuée en se situant d'emblée dans une perspective systémique, qui, du point de vue historique, constitue la science qui a amené le concept de pilotage en productique. Après l'énoncé de quelques définitions de base, nous détaillerons les différents aspects du pilotage en fonction des différents niveaux de globalité des décisions à prendre.

Pour respecter les aspects épistémologiques liés à l'émergence du concept de pilotage en productique, il faut se référer obligatoirement à l'analyse des systèmes et à l'approche systémique qui est issue des travaux et réflexions de nombreux auteurs, dont notamment (Van Bertalanffy 1969, Beer 1972, Mesarovic *et al.* 1980). La théorie des systèmes postule que tout système est un objet complexe, formé de composants distincts (ou sous-systèmes) en interactions dynamiques. L'état de chacun de ces composants est déterminé par l'état de chacun des autres composants. Les sous-systèmes peuvent être à leur tour décomposés en sous-systèmes correspondant à un niveau d'analyse plus fin.

La notion de système est une abstraction. C'est la représentation qu'en fait un observateur qui va être considérée. Cette représentation sera forcément partielle vis-à-vis de la réalité, car elle aura été construite avec un point de vue et selon une finalité : elle doit être utile à l'observateur. Un système n'existe donc qu'au travers du modèle qu'on s'en fait dans un but de simplification et de compréhension. De très nombreux travaux ont étudié la modélisation des systèmes et ont proposé des modèles 'standard'. Par exemple, lorsque la notion de système complexe est énoncée, la référence à la théorie du système général (LeMoigne 1977, Erikson 1997) s'impose tout naturellement. Tout système complexe y est décrit au travers du modèle canonique OID (Opérationnel, Informationnel, Décisionnel). Ce modèle propose la structuration d'un système en trois sous-systèmes fonctionnels (figure 1) :

- le sous-système Opérationnel, qui assure les aspects matériels de l'activité du système, ce qui se traduit par l'expression d'une valeur ajoutée par le système sur son environnement (un système qui n'aurait aucun impact sur l'extérieur est un système qui n'existe pas),
- le sous-système Informationnel, qui gère les aspects immatériels permettant la représentation du système dans son environnement, c'est-à-dire l'observation et la mémorisation des transactions du système avec son environnement et des variables d'état interne représentatives de son comportement,
- le sous-système Décisionnel, qui assure le pilotage du système en vue d'un objectif à atteindre, et qui pour cela traite de l'information, analyse le différentiel entre l'état du système et l'objectif à atteindre, prend des décisions influençant le comportement du système et régule ce comportement en fonction de ces décisions.

Par ailleurs, tout système peut être décomposé en sous-systèmes d'ordres inférieurs, eux-mêmes décrits par le modèle OID. Cette récursivité permet donc de modéliser tout système artificiel, y compris des Systèmes de Production.

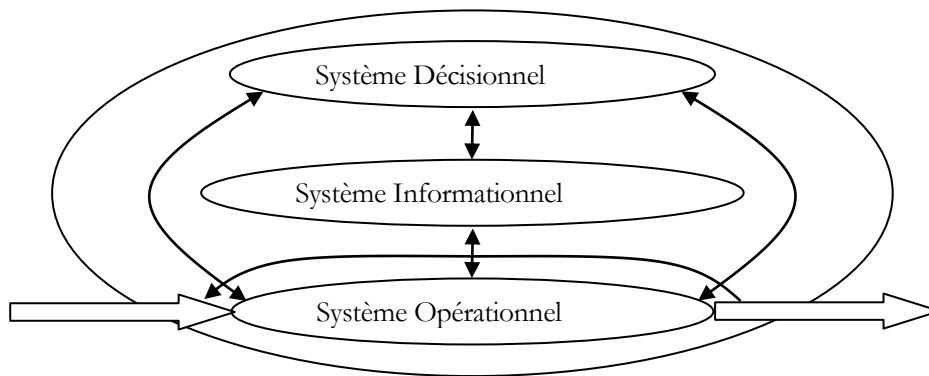


Figure 1. Modèle canonique OID d'un système complexe (LeMoigne, 1977)

Dès 1972, Jacques MÉLÈSE, au travers de l'analyse modulaire des systèmes de gestion (Mélèse 1972), pose le concept de « *module de pilotage* ». Il définit une entreprise comme étant un système ouvert d'une grande complexité. Selon lui, la maîtrise du comportement d'un tel système voué à la production ne peut être obtenue qu'au prix d'une réduction de cette complexité sans laquelle aucun commandement ne pourrait être envisagé. Pour ce faire, l'entreprise comporte une hiérarchie de niveaux successifs de contrôle et de régulation. A chacun de ces niveaux correspond une vision réduite mais solvable d'un commandement partiel. Ainsi, chaque niveau au sein de la hiérarchie comporte un module de pilotage qui induit des ordres aux niveaux inférieurs et répercute ses problèmes à son niveau supérieur. Ce module a été modélisé en différents sous systèmes, dont un décideur, et à ce titre a permis d'analyser de manière formelle les mécanismes de prise de décision. Si l'analyse globale d'un système est très rarement efficace, son analyse modulaire permet selon MÉLÈSE d'identifier les comportements élémentaires de ses constituants et d'exploiter cette connaissance pour en piloter l'ensemble.

Dans le domaine de la gestion de l'entreprise, cela signifie donc que l'on pourra analyser l'organisation en la découpant en sous-systèmes de plus en plus élémentaires, structurés de manière hiérarchisée. Par ailleurs, de manière classique, le fonctionnement de cette organisation et les interrelations entre sous-systèmes est décrit au moyen de flux : flux de matières, d'informations, monétaires, etc. Cette vision hiérarchisée de la gestion et du pilotage des systèmes rejoint d'ailleurs celle des automaticiens à la même époque (Titi 1979).

Un des concepts clés de la théorie des systèmes, avancé notamment par Jay FORRESTER (Forrester 1961), est le concept de « bouclage », qui permet de décrire des phénomènes dynamiques résultant des interactions entre les éléments d'un système :

- « *bouclage positif* », lorsqu'un événement (par exemple changement d'état d'un des éléments du système) provoque en cascade un ensemble d'autres événements qui ont pour conséquence de renforcer le changement initial et de créer ainsi un phénomène dynamique d'amplification d'une évolution ;
- « *bouclage négatif* » dans le cas inverse, qui correspond à un phénomène de retour à l'équilibre avec amortissement après un événement initial.

Un cas particulier très important de ce type de bouclage "négatif" correspond au concept de pilotage, introduit notamment par Jean-Louis LE MOIGNE (LeMoigne 1974) qui, dans la « *Théorie du Système Général* » (LeMoigne 1977), définit le modèle canonique de tout système comme composé de trois sous-systèmes (Cf. figure 2) : système « opérant » ou « physique », système d'information et système de décision. Concernant les Systèmes de Production, le pilotage est considéré comme une fonction particulière du système de décision.

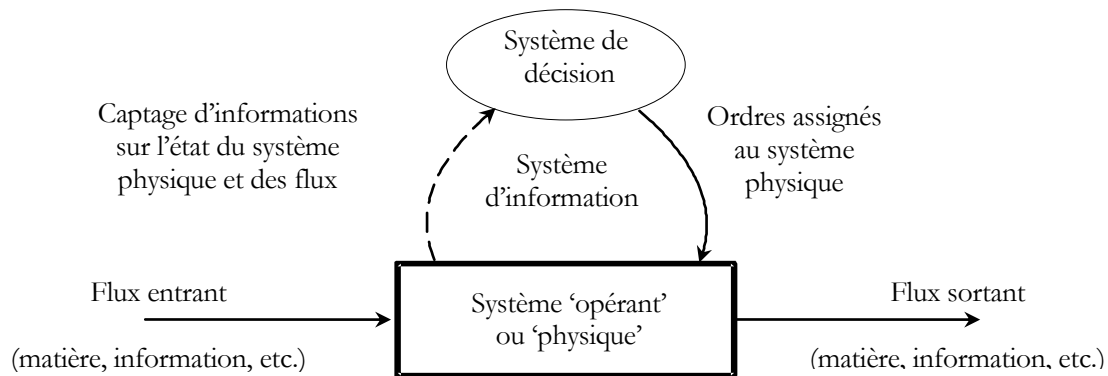


Figure 2. Le concept de pilotage, selon la théorie des systèmes

Ce modèle laisse clairement apparaître la notion propre à l'Automatique de boucle de rétroaction. En effet, l'ordre émanant du système de décision est construit par comparaison entre d'une part une consigne, qui correspond à l'état vers lequel il est souhaitable que le système évolue, c'est-à-dire l'objectif à atteindre, et d'autre part des comptes rendus en provenance des processus physiques indiquant l'état réel du système opérant.

L'objectif du traitement décisionnel est alors de minimiser l'écart entre ces deux états, en respectant des critères tels que la stabilité, la robustesse, etc.

Cette appropriation du concept de pilotage par les automaticiens l'enrichit par des aspects dynamiques qui nécessitent la prise en compte de considérations temporelles dans la prise de décision. Ceci implique un processus séquentiel de décisions en termes de planification d'activités, ainsi que de mise en œuvre et de contrôle de la réalisation de celles-ci. Cet aspect dynamique est également envisagé dans les sciences de gestion, qui empruntent à l'Automatique son vocabulaire pour définir le pilotage. Ainsi, par exemple, pour Marie Josée AVENIER (Avenier 1984), « *piloter un système, c'est choisir un objectif par rapport auquel il faut définir la meilleure trajectoire. Une fois le système lancé, il faut corriger en permanence ses écarts par rapport à la trajectoire. Il faut ensuite envisager de modifier en cours de route la trajectoire ou même l'objectif, lorsque des informations sur l'état de l'univers extérieur et sur le comportement du système montrent que le plan initial ne peut être maintenu* ».

Ceci correspond tout-à-fait à la définition du pilotage des systèmes de production issue d'une étude de l'APICS (*American Production and Inventory Control Society*) (Melnik & Carter 1987). Selon cette définition qui nous semble incontournable compte tenu de l'audience internationale de cet organisme nord-américain, le pilotage d'atelier est « *ce groupe d'activité ... directement responsable de la gestion du passage d'un ensemble d'ordres planifiés à un ensemble de produits. Il gouverne à très court terme la planification détaillée, l'exécution et la supervision d'activités nécessaires pour contrôler l'exécution d'un ordre de fabrication, à partir du moment où cet ordre de fabrication est prévu par la planification de l'entreprise jusqu'au moment où il est exécuté et ses différents aspects terminés...* ». Cette vision en différents niveaux de décision, provenant du découpage modulaire hiérarchique précédemment évoqué, se retrouve chez différents auteurs, qui l'améliorent souvent d'un aspect pertinent complémentaire. Ainsi, Bernard ARCHIMÈDE (Archimède 1991) enrichit la notion pré existante de conduite des Systèmes de Production, par ailleurs dénommée 'pilotage d'atelier' par (Geneste 1995), par les activités de planification et de suivi propre au pilotage. (Lorino 1991) met en évidence la nécessaire cohérence des règles de comportement du pilotage avec l'objectif global de l'entreprise, et induit un lien avec sa démarche processus. Damien TRENTESAUX (Trentesaux 1996) introduit au côté de la gestion prévisionnelle la notion de gestion en temps réel du traitement de la boucle de rétroaction du pilotage. En effet, les ateliers ont fonctionné longtemps avec un traitement décisionnel échantillonné sur une période largement supérieure à la fréquence d'apparition des aléas : ceci provenait du fait de la grande difficulté à générer rapidement des ordonnancements de qualité, et de l'obligation de continuer à produire malgré l'apparition d'impossibilités et de problèmes. Parallèlement, Bernard GRABOT (Grabot & Huguet 1996, Grabot & Huguet 1997) définit le pilotage comme l'ensemble des activités permettant la

mise en cohérence entre les objectifs établis par la gestion de production et la production à court terme dans l'atelier. Tout ceci est corroboré par (Manier 1995, Neubert 1997) et par Daniel ROY (Roy 1998), qui introduisent la notion de pilotage réactif, ou au niveau international par (Baker 1998) « Factory control is defined as the actuation of a plant to make products, using the present and past observed state of the plant and demand from the market ». Des définitions du même ordre se retrouvent dans des travaux postérieurs (Youssef 1998, Broissin 1999, Ounnar 1999, Berchet 2000, Hadj Youssef 2003, Gouyon 2004, Blanc 2006, Bousbia 2006, Mekaouche 2007). Cela s'explique aisément par le besoin de décomposition du pilotage en différentes strates de prise de décision superposées et par la nécessité d'assurer la cohérence entre les décisions prises de manière prévisionnelle et celles qui doivent être prises en temps réel.

1.2. Systèmes de Pilotage pour Systèmes de Production

Les fonctions associées au concept de pilotage des Systèmes de Production peuvent être organisées de manière hiérarchique au sein d'un système de production (Jones & McLean 1986). Il s'agit là d'une approche traditionnelle qui a conduit à la proposition de différentes architectures, dont les plus importantes ont été développées par le *National Institute of Standards and Technology* : citons *Automated Manufacturing Research Facility* (AMRF) en 1987 (Senehi *et al.* 1994), ou *Intelligent Systems Architecture for Manufacturing by Real-Time Control Systems* (ISAM-RCS) en 1996 (Huang 1996).

- **Niveaux de prise de décision en pilotage**

Proposée par la communauté scientifique ayant étudié le paradigme CIM (*Computer Integrated Manufacturing*) (Doumeingts 1990, Pfeifer & Stöblen 1991), la description du pilotage des systèmes de production comme la superposition de cinq niveaux décisionnels, du plus global au plus particulier, et à des horizons temporels distincts, du plus long terme au temps réel, a été largement diffusée *via* (Aléonard *et al.* 1994). La figure 3 montre que ces cinq niveaux du pilotage se répartissent en deux phases : la gestion prévisionnelle et le pilotage en temps réel du système de production.

La gestion prévisionnelle concerne les décisions prises hors-ligne (donc avant lancement et exécution). En effet, les horizons temporels concernés et les structures mises en jeu se situent en dehors de ce qui concerne l'atelier proprement dit. Il s'agit d'établir un planning prévisionnel détaillé de la production en fonction des produits, marchés, procédés, moyens, charges, ... Le pilotage en temps réel, par contre, concerne les décisions prises en ligne, c'est-à-dire après le lancement et pendant l'exécution.

Nous distinguons trois fonctions de gestion prévisionnelle :

- la planification correspond à un horizon temporel à long terme et aboutit à la définition du Plan Directeur de Production (PDP) à partir des objectifs commerciaux (commandes fermes et prévisionnelles), financiers (coûts fixes, coûts de fabrication) et de production (données techniques, moyens de production) ;
- la programmation établit le programme prévisionnel de production à partir du plan directeur de production et définit les besoins nets en fonction des quantités et des délais de production (besoins bruts), des approvisionnements ainsi que des quantités déjà en stock ;
- l'ordonnancement élabore un planning de production détaillé en fonction de la charge et de l'état des moyens de production ; le planning détaillé de fabrication contient par atelier tous les Ordres de Fabrication (OF) composés de la référence et de la quantité de pièces à produire ainsi que de la date de lancement au plus tôt et de la date de fin au plus tard.

De même, nous distinguons également deux fonctions de pilotage en temps réel :

- la conduite est chargée de réaliser la production prévue définie par l'ordonnancement dans le planning détaillé de production ; à ce niveau, tous les problèmes liés à l'opérationnalisation des décisions prévisionnelles doivent être réglés ; il s'agit notamment d'intégrer l'ensemble des contraintes de fabrication (contrôle qualité, arrêts liés à la maintenance, ...) et de réagir aux aléas de production par un suivi de l'exécution du planning de production ;

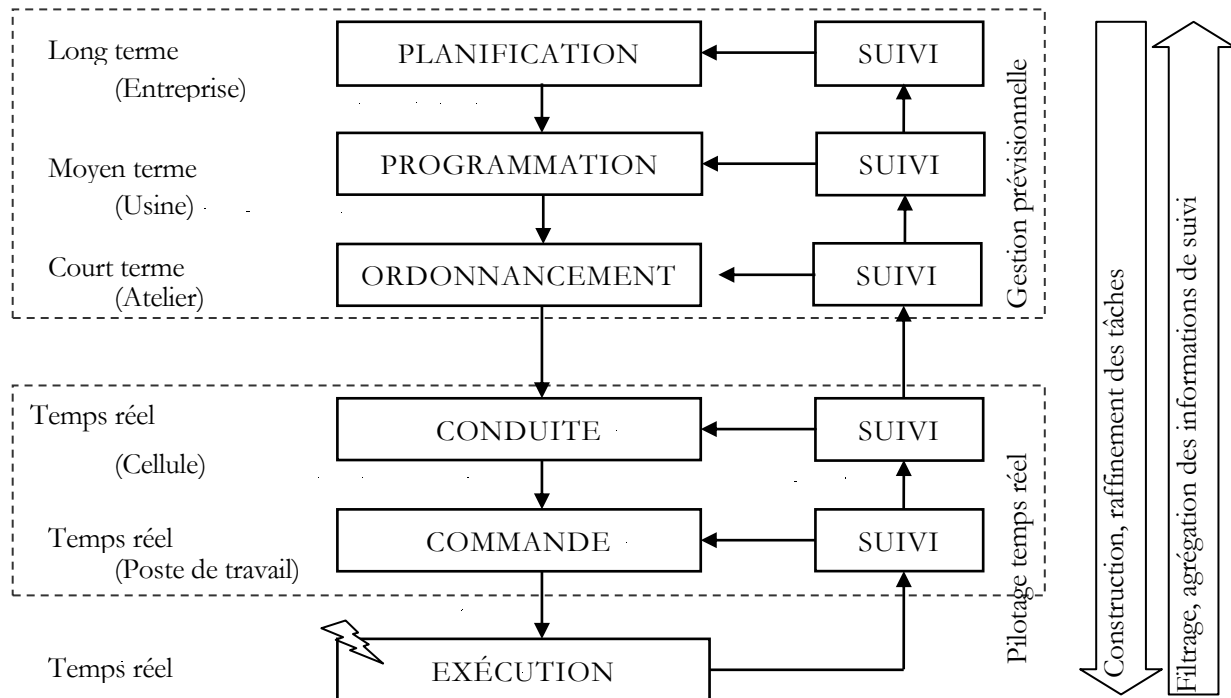


Figure 3. Niveaux de pilotage de la production

– la commande est le dernier niveau décisionnel, qui est directement en relation avec le système physique, car elle a un rôle d'interface et d'interpréteur et traduit un ordre en une séquence automatique ; exceptionnellement, lorsque la nature d'une perturbation nécessite une action locale non intégrée par la commande, un opérateur assure le suivi de l'exécution des ordres et intervient localement.

Notons que le passage du niveau 'Commande' au niveau 'Exécution' se fait en 6 niveaux hiérarchiques dans ISAM-RCS.

Ce modèle est très intéressant, car il permet de comprendre les problématiques actuelles rencontrées en pilotage. En effet, si les architectures hiérarchiques et pyramidales développées à partir du paradigme CIM se sont révélées intéressantes en termes de coûts et de fiabilité du système d'information, elles se sont révélées plutôt décevantes en termes de performances temporelles et de réactivité. Cela s'explique par le nombre élevé de strates de décision à franchir, au temps propre de traitement de l'information à chaque niveau, et au cloisonnement relatif de ces niveaux, cloisonnement que justement leur intégration devait supprimer.

En fait, l'intégration s'est faite parallèlement et séparément dans le monde des systèmes d'information pour la gestion d'entreprise et dans celui des équipements de terrain automatisés et communicants, avec quelques caractéristiques communes.

Au niveau des systèmes de gestion intégrés de type ERP (*Enterprise Resource Planning*), nous pouvons dire que l'intégration des données nécessaires en un seul système d'information est à la base de leur développement. Nous pouvons constater que ces systèmes sont capables de faire travailler ensemble des centres de décision géographiquement répartis, ayant des modes de gestion et d'organisation différents et même des applications informatiques hétérogènes. La tendance va vers toujours plus de coopérations interentreprises, voire vers des collaborations généralisées *via* des *e-community* ou des EAI (*Enterprise Application Integration*). Tout ceci facilite l'adaptation du système d'information aux évolutions de l'environnement et du marché.

Au niveau de l'exécution, nous pouvons également constater les degrés d'interopérabilité très importants du matériel et des composants automatisés pour le contrôle-commande, ceci malgré l'existence de plusieurs

technologies pour assurer la communication via des réseaux industriels (Profibus, Fip, CAN, Ethernet industriel...). La norme de fabrication batch ANSI/ISA-88 contribue fortement dans ce sens. Elle permet de combiner un modèle 'procédé' (qui décrit la gamme de transformation d'un produit), un modèle 'procédural' (qui établit l'enchaînement hiérarchique et chronologique des actions (recettes) à accomplir pour obtenir les transformations conformes au modèle procédé), et un modèle 'physique' qui définit une hiérarchie d'équipements potentiellement hétérogènes (et qui permet de mettre en œuvre les actions décrites dans le modèle procédural). Le contrôle-commande relève alors d'API (Automates Programmables Industriels, ou PLC, *Programmable Logic Controller*) ou de DCS (système de commande réparti, ou *Distributed Control System*). Machines, actionneurs et capteurs se retrouvent ainsi interconnectés et outre le contrôle-commande de base et les dispositifs de protection du personnel, intègrent des fonctions de surveillance et de diagnostic, des fonctions de téléalarme via des e-technologies. Tout ceci favorise la reconfiguration de l'outil de production, et cette tendance est grandissante avec l'apparition des technologies infotroniques.

C'est à l'articulation entre ces deux grandes familles d'applications que se situent les plus grandes difficultés de communication et d'interactions. Nombreuses sont en effet les entreprises ayant implanté un ERP n'ayant que peu d'impacts sur l'organisation des activités des ateliers, ou des entreprises extrêmement automatisées sans système de gestion intégrée, ou encore des entreprises dotées des deux types d'application, qui fonctionnent indépendamment les unes des autres. Ces problèmes proviennent des différences d'horizon temporel, de nature des informations concernées et de type de personnels impliqués.

Pour pallier à ce constat et mieux articuler le fonctionnement de la gestion prévisionnelle et celui de l'automatisation des processus, le concept de MES (*Manufacturing Execution System*) a été proposé. En fait, les MES sont des applications de pilotage qui assurent en totalité ou partiellement un panel modulaire de 11 fonctions en cohérence avec les données utilisés par les niveaux de gestion et de l'exécution de la production, qui gardent leur propre système d'information. Ces développements ont débouché en 2000 sur la norme ANSI/ISA-95, qui a finalement été adoptée comme référentiel international (IEC 62264-1:2003, IEC 62264-2:2004, IEC 62264-3:2007). Outre une définition claire du vocabulaire relatif aux concepts manipulés, ce référentiel propose une structuration orientée objet de ces concepts. De nos jours, un grand nombre d'entreprises de production manufacturière utilisent des MES pour faire le lien entre leur ERP et leurs systèmes opérationnels (MacDonald 1993, Samanish 1993, Nguyen 1996). De très nombreux produits existent sur le marché (Scott 1996), mais ces produits sont généralement assez figés, c'est-à-dire qu'ils manquent de possibilités de configuration. En fait, ils correspondent à une organisation standard avec une batterie de fonctionnalités standards qu'il est difficile d'adapter parfaitement à la situation de chaque entreprise sans complexifier outre mesure le système d'information et générer des risques de développement et de maintenance informatique (McGehee *et al.* 1994, Kadar *et al.* 1998).

Tout ceci nous montre clairement toute la complexité de la fonction pilotage dans l'entreprise : nous pouvons alors parler de système de pilotage, constitué par exemple de différents sous-systèmes : ERP, MES...

- **Système de pilotage pour les systèmes de production**

Le système de pilotage d'une organisation est l'ensemble des composants décisionnels lui permettant de tendre en permanence vers les objectifs qu'elle poursuit. Ces composants décisionnels sont en interaction avec des opérateurs humains (des managers, des chefs d'atelier, des chefs d'équipe, des opérateurs de chaîne...) qui supervisent, génèrent ou valident les prises de décision. Un système de pilotage doit fournir à chacun de ces acteurs les informations nécessaires à la prise de décision, quel que soit leur niveau de responsabilité au sein de l'organisation. Pour cela, un aspect fondamental d'un système de pilotage réside dans sa capacité à présenter les informations sous une forme pertinente, souvent au travers d'une agrégation des données qui construit ainsi de l'information. Ceci comprend notamment des tableaux de bord, mais aussi des fonctions d'archivage (historique, livres de bord...) spécifiques à chaque type d'acteur. De cela découle les caractéristiques principales d'un système de pilotage : répartition des fonctions de pilotage au niveau de chaque acteur, en fonction de ses responsabilités, opérationnalisation des actions décidées, évaluation de performances et comparaison avec des objectifs mesurables ou quantifiables. Un système de pilotage est donc constitué d'un ensemble de centres de décision interconnectés (figure 4).

Cela donne une structure hiérarchisée et/ou distribuée de centres de décision qui élaborent des informations-actions en direction des activités du système physique. Dans ce schéma, les centres de décision du niveau le plus proche du système opérant pilotent donc chacun une partie de ce dernier. Ils rendent compte de leur mission au centre de décision de niveau immédiatement supérieur qui les coordonne. Ce centre coordinateur leur transmet en retour un « *cadre de décision* », c'est-à-dire des contraintes à respecter et des objectifs à poursuivre, et ainsi de suite en remontant progressivement aux centres de décision des niveaux les plus globaux.

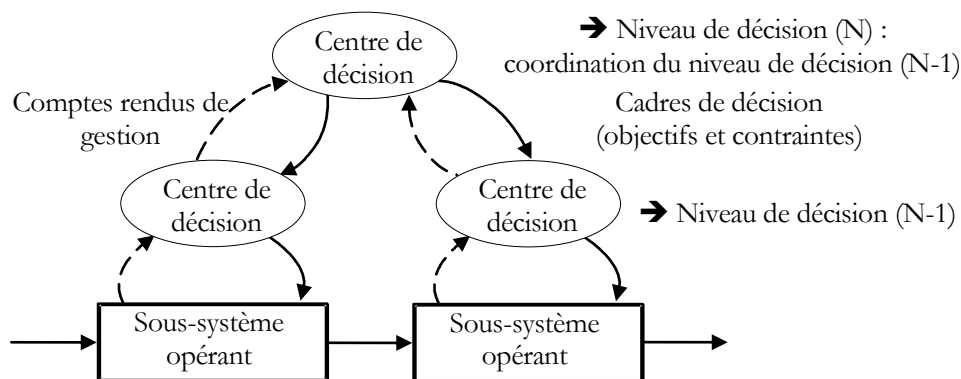


Figure 4. Niveaux de pilotage de la production

Une décision peut être plus ou moins rigide, en fonction du degré de latitude que laisse le « *cadre de décision* » aux niveaux inférieurs. Une décision peut également être monocritère ou multicritère. Recourir à un critère unique pour fonder une décision de pilotage présente un avantage : celui de bien poser le problème, c'est-à-dire qu'il y aura le plus souvent une solution. Toutefois, cela ne garantit pas la bonne formulation du problème eu égard à la réalité concernée (Ounnar 1999). Souvent, plusieurs critères plus ou moins conflictuels sont pertinents et légitimes pour piloter le Système de Production et nécessitent un compromis ou un arbitrage : pour cela, Fouzia OUNNAR a proposé l'emploi d'une méthode d'aide à la décision multicritère. L'allocation d'une tâche, par exemple, est un processus décisionnel qui résulte d'une étude portant sur des critères de coût de production, de temps de changement de série, de temps de convoyage, de temps d'attente dans le stock amont, de qualité de production, etc. La notion d'optimum absolu n'a donc pas de sens, car il n'y a jamais un seul point de vue pour évaluer la performance. Même s'il existe des décisions qui sont meilleures que d'autres, la meilleure décision vis-à-vis de tous les aspects possibles est un mythe.

Une décision peut également être caractérisée par ses aspects temporels. En premier lieu, son horizon temporel, à long, moyen ou court terme. A long terme, la décision concerne le niveau stratégique et débouche sur des orientations durables de l'entreprise. Le niveau tactique, à moyen terme, englobe les décisions qui mettent en œuvre les objectifs de l'entreprise et va jusqu'aux décisions de calcul de charge et de préparation du travail. A court terme (voire en temps réel), la décision devient opérationnelle et met en application le plan d'actions construit par le niveau tactique. Ensuite, la portée d'une décision définit son importance ou son impact. Un aspect de cet impact peut être la durée durant laquelle cette décision va influencer le déroulement de la production. Enfin, le mode de déclenchement du besoin de décision peut être périodique (c'est-à-dire régulier et récurrent) ou événementiel (au cas par cas, selon l'apparition contingente d'un nouveau fait).

En pilotage, il existe plusieurs types de décision. Sans vouloir faire une énumération exhaustive, nous citerons les décisions :

- d'affectation, qui concernent la présélection de ressources pour l'exécution d'une tâche ;
- d'attribution, qui permettent l'arbitrage entre plusieurs ressources disponibles ;
- de remise en cause, qui traduisent l'apparition d'un fait venant en opposition avec le plan prévisionnel ;
- d'anticipation, qui facilitent la construction de synchronisations sur des dates de fin de tâche ;

- de déclenchement correctif, qui mettent en œuvre les activités de maintenance ;
- de régulation, dont l'objectif est d'ajuster le comportement autour d'une consigne ou d'affiner un paramètre pour obtenir une meilleure performance.

Des associations et des combinaisons de ces types de décision sont monnaie courante en pilotage, et contribuent à en assurer toute la complexité.

Enfin, un dernier aspect permettant de classer la prise de décision est son caractère individuel ou collectif. Si ceci est très facilement intelligible pour les prises de décision effectuées par les hommes, il en est de même pour les processus de prise de décision automatiques où les décisions peuvent être collectives.

Un système de pilotage doit répondre aux trois concepts majeurs de la Théorie des Systèmes et de la Cybernétique : la totalité, la circularité et l'équifinalité. Le concept de totalité signifie qu'un système de pilotage est quelque chose de plus que la somme de ses centres de décision. Il est considéré comme un tout et ce tout implique l'apparition de capacités émergentes que ne possédaient pas les différents centres de décision du système de pilotage. La circularité signifie que les relations entre les centres de décision ne sont pas causales et donc linéaires, mais circulaires, de par les relations de rétroaction et d'influences réciproques entre ces centres de décision. Ces relations ne sont jamais unilatérales. Si le centre de décision X affecte le centre de décision Y, Y affecte X en retour, ce qui à son tour influence la façon dont X affectera Y. L'équifinalité signifie que l'état actuel du système de pilotage ne permet ni de déduire son histoire, ni de prévoir son avenir. Le comportement d'un système peut avoir des effets d'origines diverses. Les changements observés dans un système en sont pas seulement déterminés par les conditions initiales du système, mais aussi par les divers paramètres de ce système et par la nature même du processus de décision qui provoque les changements. Pour comprendre le fonctionnement d'un système de pilotage, il importe de saisir son organisation structurelle et fonctionnelle, c'est-à-dire son architecture.

1.3. Systèmes de Pilotage hétérarchiques

L'architecture d'un système de pilotage se définit vis-à-vis de l'ensemble des relations multilatérales, durables, hiérarchisées et structurées existant entre ses différents sous systèmes et reflétant son organisation. Souvent, l'implantation physique d'un système de pilotage découle de son architecture fonctionnelle. Jusqu'au milieu des années 80, les systèmes de pilotage étaient organisés autour d'architectures exclusivement centralisées, que nous ne détaillerons pas ici. Ensuite, nous avons pu observer une évolution de ces architectures autour de la notion de hiérarchie. Enfin, l'apparition des nouvelles technologies de l'information et de la communication (NTIC) a favorisé le développement d'architectures hétérarchiques, plus en adéquation avec la nécessaire répartition des fonctions de pilotage. Ceci nous permet d'établir une typologie générale des systèmes de pilotage (figure 5), dont nous détaillerons les aspects hiérarchiques et hétérarchiques.

Dans tous les cas, le problème du pilotage, pris d'un point de vue global à un niveau de prise de décision donné et pour un horizon temporel donné, doit être décomposé. Ce constat a donné lieu à l'apparition de systèmes de pilotage à architecture hiérarchisée.

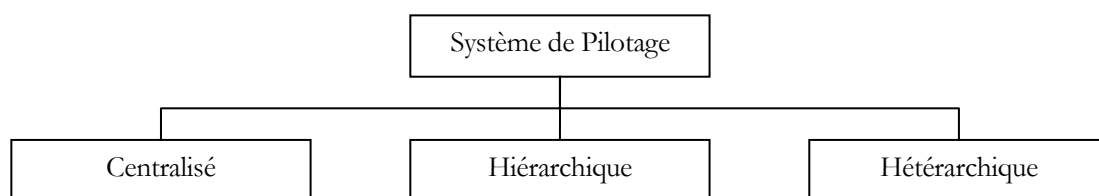


Figure 5. Typologie des systèmes de pilotage

• Structures hiérarchisées et/ou coordonnées

La décomposition du problème de pilotage à un niveau N de décision se fait *via* une analyse ayant une granularité suffisante (ne pas aller trop dans les détails, faire des hypothèses simplificatrices, poser des contraintes *a priori*...) pour pouvoir obtenir une solution opérationnelle au niveau N-1. Il en sera de même pour le passage au niveau N-2, associée à un fractionnement d'un champ de recherche à une sous partie du système de production, et ainsi de suite... Ceci entraîne une multiplication de modèles spécifiques à chaque niveau de décision, souvent imperméables les uns aux autres. Le propre d'un système de pilotage hiérarchisé est donc que ses diverses entités d'un certain niveau N de décomposition sont dirigées par une ou plusieurs entités du niveau N+1. Les systèmes de pilotage hiérarchisés peuvent donc être considérés comme des systèmes où la prise de décision se fait de manière localement centralisée (figure 6, schéma de gauche), en fonction des décisions prises par le niveau supérieur et des informations provenant des centres de décision du niveau inférieur.

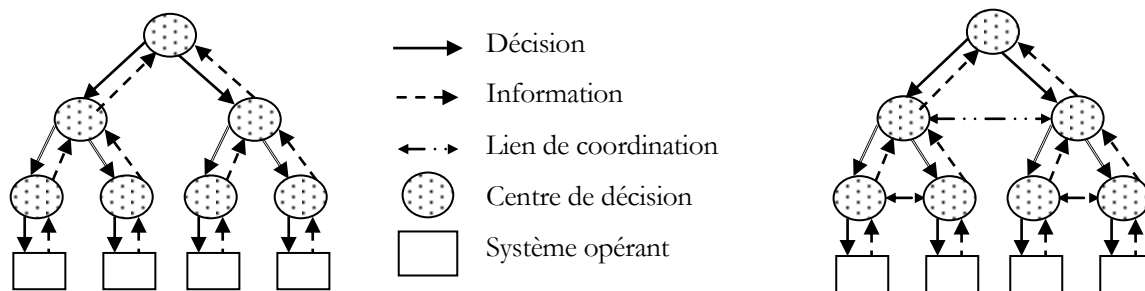


Figure 6. Structures hiérarchisées et/ou coordonnées

Selon Colette MERCÉ (Mercé 1987), ceci doit être réalisé en garantissant la robustesse et la cohérence : les décisions agrégées retenues au niveau supérieur N de la structure doivent garantir l'existence de solutions détaillées satisfaisant l'ensemble des contraintes détaillées du niveau N-1 et toute décision détaillée au niveau N-1 doit rester compatible avec l'ensemble des décisions agrégées du niveau N.

De nombreux exemples illustrent ce type de structure où nous pouvons observer une arborescence décisionnelle favorisant les échanges verticaux d'information. Nous pouvons citer le modèle CASPAIM (Bourey 1988), le modèle NCS (Biemans & Vissers 1991), le modèle PCS (Archimède 1991). Si ces modèles permettent d'obtenir facilement des solutions sur un nœud de l'arbre, ils génèrent des difficultés importantes lorsque les décisions à prendre nécessitent des informations concernant d'autres branches de l'arborescence décisionnelle. Pour pallier à cette difficulté majeure de circulation d'informations, les structures hiérarchisées ont été complétées par des liens de coopération horizontaux. Il s'agit d'un premier pas décisif vers l'intégration des relations entre centres de décision : la coordination s'effectue au travers de relations inter strates et parallèlement à la coopération intra strate (figure 6, schéma de droite). Un bon exemple de ce type de structures est l'approche CODECO (Binder 1977, Kallel 1985). Le principal apport de cette approche est de structurer la prise de décision en fonction d'informations hybrides provenant de centres de décision des niveaux supérieurs, inférieurs et d'autres centres de décision du même niveau. Il est toutefois à noter si la prise de décision n'est plus exclusivement hiérarchisée et/ou centralisée, l'autonomie et la décentralisation dans CODECO sont relativement faibles, dans la mesure où la latitude de la prise de décision reste incluse dans un « cadre de décision » imposé par le seul niveau supérieur, et qu'en cas d'absence de solution, c'est à ce niveau supérieur de décision qu'il revient de prendre la main. Par ailleurs, les décisions prises à un niveau N s'appliquent au niveau N-1.

• Définition du concept d'hétérarchie

Toutefois, ce début de relations tout azimut entre centres de décision, renforcé par les développements technologiques spectaculaires en matière de réseau de communication et celui de l'informatique distribuée, a

largement contribué à l'apparition des systèmes hétérarchiques de pilotage. Sous ce néologisme sont regroupées un grand nombre d'approches distribuées ou non centralisées, voire décentralisées, ces caractéristiques pouvant être totalement ou partiellement appliquées. Un panorama très complet de ces systèmes de pilotage a été présenté par Damien TRENTESAUX dans (Trentesaux 2002) et actualisé dans (Trentesaux 2007).

Le terme d'hétérarchie a été pour la première fois utilisé dans le domaine biomédical par (McMulloch 1945) pour décrire des mécanismes d'influence. Partons des 2 hypothèses suivantes : X influence Y et Y influence Z. Si X influence Z, alors X est au sommet d'une structure hiérarchique. Si Z influence X, alors l'ensemble {X, Y, Z} constitue une hétérarchie. Nous ne pouvons plus parler d'un arbre de relations liant les centres de décision, mais plutôt d'un graphe permettant de représenter des interactions directives (plutôt verticales) et les interactions coopératives (plutôt horizontales). En bref, c'est la non-directivité globale des prises de décision qui permet de définir une structure hétérarchique, ainsi que le définit (Trentesaux 2007) : « une structuration de relations non directives ... est appelée hétérarchie ».

Une structure de pilotage hétérarchique n'est pas pour autant incompatible avec la notion de décomposition en niveau de décision. En effet, il peut coexister au sein d'un même système distribué des interactions coopératives opérant à différents niveaux de décision, comme cela est illustré à la figure 7. Plusieurs écoles de représentation existent pour schématiser les structures hétérarchiques. Certains, par exemple (Trentesaux 2002), représentent les interactions verticales et horizontales d'un même niveau de décision par un trait horizontal illustrant le réseau de communication reliant les centres de décision concernés (figure 7, schéma de gauche). D'autres, par exemple (Saad 1995), préfèrent représenter les interactions directes, reliant deux à deux les centres de décision (figure 7, schéma de droite). La première solution présente l'avantage d'être plus structurante du point de vue de l'analyse d'une architecture, mais ne précise pas la nature des relations inter centres de décision. La seconde solution montre plus clairement les différentes interactions (ce n'est pas parce que deux entités sont connectées au même réseau de communication qu'elles inter agissent). Par ailleurs, il est possible de jouer sur le type de trait du graphe des relations et sur leur orientation pour caractériser plus précisément les différents types d'interaction et donc l'architecture du système de pilotage. Toutefois, cette seconde solution peut rapidement devenir complexe avec l'augmentation des entités en interaction.

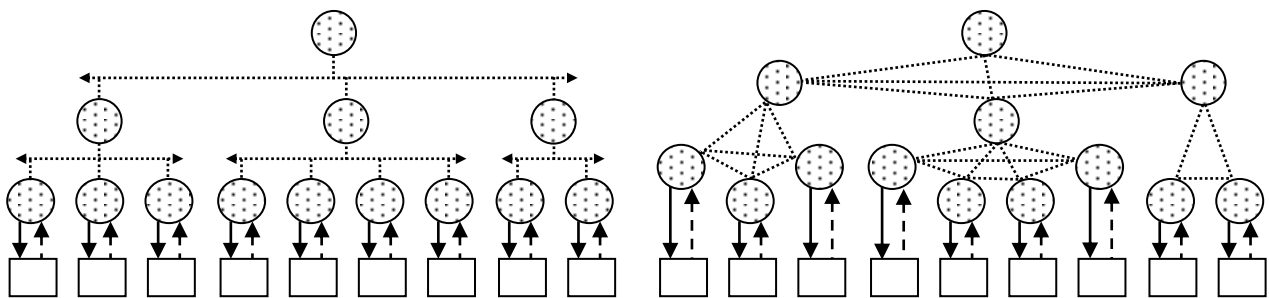


Figure 7. Structures hétérarchiques, vue par niveaux de décision et vue par interactions

Malgré le fait que ces représentations soient très ouvertes, elles ne permettent pas bien de distinguer la forme (disposition architecturale ou structurelle des centres de décision) du fond (nature des interactions : relations directives ou non).

- **Structures distribuées ou décentralisées**

Les informaticiens définissent un système distribué comme un ensemble de sous systèmes pouvant échanger des informations par l'intermédiaire d'un réseau de communication (Banâtre & Banâtre 1991). Cette définition est très générale et ne suffit pas à caractériser un système où les centres de décision n'ont pas de caractère localement centralisateur. Par exemple, si dans une structure hiérarchisée, les échanges d'informations se font au travers d'un réseau de communication reliant les différents centres de décision, nous pouvons considérer que nous sommes face

à une structure de pilotage hiérarchisée distribuée. Si par ce même réseau circulent entre des centres de décision de même niveau de responsabilité des informations de coordination, nous serons face à une structure de pilotage hiérarchisée distribuée et coordonnée. S'il est nécessaire qu'au sein des mécanismes de prise de décision interviennent des informations de coopération, alors nous sommes dans une structure de pilotage hétérarchique.

Le concept d'hétérarchie s'oppose donc à celui de hiérarchie. Ce dernier étant fondamentalement très proche du concept de centralisation, il est légitime de s'interroger sur les relations liant hétérarchie et décentralisation.

Selon (Mintzberg 1982), une « structure est centralisée quand tous les pouvoirs de décision sont à un seul point dans l'organisation », et une « structure est décentralisée lorsque le pouvoir est dispersé entre de nombreuses personnes ». Cela signifie que les différents centres de décision assurent collégialement le pilotage des actions en cours. Par ailleurs, il distingue la décentralisation verticale, qui consiste à transférer du pouvoir de décision vers les couches de décision inférieures, de la décentralisation horizontale, qui consiste à transférer et à partager le pouvoir de décision entre différents centres de décision. La mise en œuvre simultanée de ces 2 aspects de la décentralisation revient en fait à rapprocher les prises de décision du lieu et du temps de leur application.

Cela dit, les discussions dans la communauté scientifique autour des structures architecturales se situent dans un espace linguistique utilisant les termes « centralisé, hiérarchisé, décentralisé, ... ». Cet espace inclut bien entendu toutes les solutions intermédiaires et toutes les solutions hybrides, décrit sous la base linguistique de 'semi-xx', 'pseudo-yy' ou encore 'zz partielle', 'xy au sens large', 'xz-supervisé'... Les architectures des systèmes de pilotage utilisant de telles structures sont classées le plus souvent dans la catégorie 'hétérarchique'.

Nous devons à (Trentesaux 2002) le remarquable travail d'inventaire et de classification d'un très grand nombre de contributions scientifiques sur le pilotage non centralisé des Systèmes de Production. Sans reprendre ici ce travail fondamental, nous allons toutefois rappeler les termes de cette classification, qui se fait sur la base d'un couple de caractérisations : la caractérisation du modèle global du système de pilotage <SP>, suivi de celle des entités <SE> constituant ce système de pilotage. Chacune de ces caractérisations est obtenue par un triplet reprenant les vues fonctionnelle (F), organique (O) et évolutionniste (E) : <S> : <S : F, O, E>.

Pour le modèle global du système de pilotage, la vue fonctionnelle permet de distinguer les approches distribuées (DIS) des approches décentralisées (DEC) et de celles mixant les deux (MIX). La vue organique précise l'agencement des centres de décision vis-à-vis de leurs interactions directives (I), coopératives (III) ou mêlant les deux (II), tandis que la vue évolutionniste caractérise la dynamique architecturale : soit le modèle est figé (organisé), soit il évolue dans le temps, par l'apparition ou la disparition d'éléments le composant (auto-organisé).

Pour le modèle des entités constitutives, la vue fonctionnelle permet de distinguer si le système de pilotage est constitué d'entités permettant la mise en œuvre du pilotage (EDP), d'entités contribuant au pilotage sans avoir de système opérant (EPP) ou d'un ensemble des deux (MIX). La vue organique précise seulement si la définition de ces entités est récursive (Rc) ou non (E). Enfin, la vue évolutionniste caractérise le comportement des entités : réactif ou adaptatif.

Cette classification souffre néanmoins de l'absence d'une analyse du degré d'avancement et/ou d'achèvement des propositions étudiées. Ce positionnement exige d'utiliser une métrique reconnue permettant d'expliquer, de positionner, de comparer, les divers procédés de développement proposés par les uns et par les autres. Une telle métrique existe déjà en Génie Logiciel sous le nom de Capability Maturity Model (C.M.M.) (Paulk *et al.* 1993), tel que le suggère Gérard MOREL (Morel *et al.* 1997 ; Neunreuther *et al.* 1997). Cette métrique des procédés de développement système introduit 5 critères d'appréciation de la maturité du système proposé (cf. figure 8). Les trois premiers niveaux sont de l'ordre du qualitatif, c'est-à-dire de l'évaluation par un observateur. Les deux derniers niveaux sont d'ordre quantitatif, c'est-à-dire qu'il est possible de poser des indicateurs pour observer l'évolution des performances du système de pilotage.

Au niveau 'Initial', le système de pilotage n'est pas suffisamment explicite et rien ne garantit qu'il ne varie pas lors d'une nouvelle application. Par exemple, le système de pilotage décrit n'a fait l'objet d'une mise en œuvre qu'au travers d'une simulation.

Au niveau 'Reproductible', le système de pilotage est explicite, c'est-à-dire qu'il peut être reconduit d'une application à une autre. Une nouvelle application de la contribution se fera par exemple par l'identification d'analogies entre des modèles existants, résultant d'applications antérieures de cette contribution, et le nouveau système à modéliser.

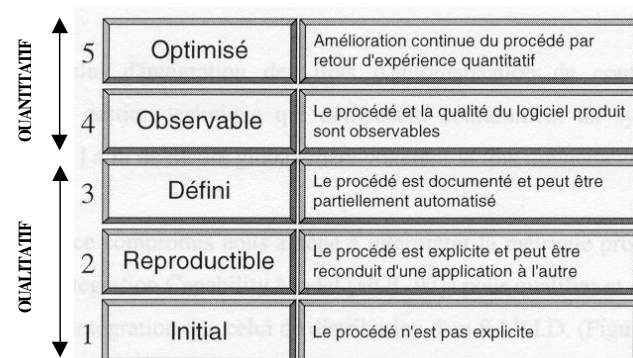


Figure 8. Métrique proposée en Génie Logiciel par le *Capability Maturity Model*

Au niveau 'Défini', le système de pilotage est documenté et peut être partiellement automatisé. Par exemple, nous trouverons ici des méthodes explicitant l'approche de modélisation d'un système par déduction de modèles particuliers à partir d'un modèle de référence.

Dès le niveau 'Observable', le système de pilotage doit pouvoir être évalué ainsi que les performances obtenues. Par exemple, le modèle de référence doit être établi en utilisant un cadre de modélisation formel (Réseau de Petri, *Discrete Event system Specification*, automates...), ce qui permet de mettre en œuvre des approches de validation et/ou de vérification des modèles en question.

Enfin, une contribution sera au niveau 'Optimisé' lorsque le système de pilotage pourra être amélioré en continu par retour d'expérience quantitatif. Des méthodes de modélisation explicitant la rétroaction de la validation et/ou de la vérification des modèles produits sur l'approche de modélisation elle-même, font parties de cette catégorie.

Malgré la relative étendue des solutions proposées par les différents contributeurs, les systèmes de pilotage hétérarchiques suscitent un fort intérêt dans la communauté scientifique du fait de quelques avantages commun à toutes ces solutions. En premier lieu, il convient de considérer que de tels systèmes de pilotage peuvent s'appuyer sur l'hétérogénéité du matériel informatique utilisé, en utilisant le plus souvent des équipements banalisés. Cet aspect renforce la conception modulaire du système de pilotage, qui peut croître en fonction des besoins des utilisateurs. Ceci contribue à la réduction des coûts financiers associés. Par ailleurs, cela va dans le sens du développement d'autres types d'applications informatiques actuelles. Un autre aspect important est une plus grande disponibilité du système de pilotage, même lors de la défaillance de l'un de ses constituants. Enfin, un dernier aspect concerne le partage des informations, dont une partie peut rester locale, et donc privative et protégée, et l'autre publique accessible. Le concept d'hétérarchie met en œuvre ces différents aspects, mais cela reste insuffisant : si la coopération entre les centres de pilotage dépend de leur interopérabilité, c'est à dire de la compatibilité de leurs services, protocoles, ressources et performances temporelle, la notion la plus importante reste leur autonomie, donc en d'autres termes leur capacité décisionnelle ou autrement dit leur intelligence.

1.4. Systèmes manufacturiers intelligents

L'intelligence est un caractère à laquelle se réfère de plus en plus d'auteurs à propos des systèmes manufacturiers. Il faut reconnaître que l'aptitude des systèmes informatiques à traiter de manière de plus en plus complexe des volumes d'information toujours en plus grande quantité pousse à l'emploi de ce terme (Jorion 1989). Il convient toutefois de relativiser les choses et de préciser exactement ce que nous entendons par systèmes manufacturiers intelligents. Ensuite, sans pour autant refaire un panorama aussi complet que celui proposé par Roberto TETI (Teti

1997), nous présenterons les pistes de mise en œuvre de l'intelligence dans les systèmes manufacturiers de production.

- **Caractérisation de l'intelligence appliquée à un système de production**

La notion d'intelligence suppose plusieurs aspects et il est difficile de la définir relativement à un système de production. Appliquée à un tel système artificiel, la référence reste généralement l'intelligence humaine, laquelle n'est d'ailleurs pas homogène en fonction de la capacité de chaque individu, de sa culture et de son niveau de connaissance. Elle comprend globalement ce que nous pourrions appeler l'analyse, l'élaboration et la conceptualisation. L'analyse concerne la compréhension d'un fait, d'un objet d'une situation. Cela signifie qu'en fonction de données de perception que nous postulerons comme étant primaires, il est possible d'en tirer une information de perception de plus haut niveau. Par exemple, en vision industrielle, l'analyse d'une image permet de voir si le produit est défectueux (Fillatreau *et al.* 2008). Un autre aspect de l'analyse concerne le raisonnement déductif. L'information intelligible tirée de l'analyse sera alors tirée de plusieurs observations simultanées ou chronologiques. Par exemple, en robotique mobile, si un AGV (*Automated Guided Vehicles*) souhaite s'engager sur un segment qui est occupé par une autre AGV, il peut être préférable de chercher à dérouter cet AGV (Broissin *et al.* 1996), alors que les deux faits pris séparément ne permettent pas d'avoir cette information. Ensuite, l'élaboration touche à la mise en place d'une stratégie ou d'un plan. Ceci revient en fait à choisir à partir d'une analyse préalable dans une banque de référence la stratégie ou le plan *ad hoc*, puis à la paramétrer en fonction de cette analyse (Chouraqui & Portefaix 1998). L'élaboration concerne également la faculté d'adaptation, qui se traduit par des stratégies ou des plans permettant de faire évoluer la stratégie ou le plan en cours. Enfin, la conceptualisation permet d'aborder des notions complexes telles que l'apprentissage (identification et appropriation de nouvelles connaissances) et l'auto finalisation (auto définition de nouveaux objectifs). Ces derniers aspects font clairement référence à une certaine compréhension de ses propres raisonnements, ce qui induit une réelle conscience de soi, propre à l'intelligence humaine. L'intelligence artificielle, vue seulement sous un angle applicatif et ingénierie, vise plutôt à simuler l'intelligence, ce qui revient essentiellement à donner de l'autonomie aux systèmes qu'elle pilote. Cela suppose que ces systèmes intelligents doivent être organisés dans leur composition et que leur comportement doit être régulé. Ces propriétés sont d'ailleurs celles d'un système classique : 'la régulation entre les composants du système est donc essentielle et produit ce qui peut être appelé un certain ordre' (Van Bertalanffy 1969). Cet ordre, c'est une autre manière de nommer le comportement du système, et cela doit permettre de définir un fonctionnement présentant des caractères réels de permanence ou de répétitivité. L'intelligence ne peut provenir d'un tirage aléatoire dans une base de solutions, mais apparaît comme la conséquence du fonctionnement normal des composants du système, en interaction, chacun ayant son rôle, son champ d'application et ses règles de réaction aux interactions (Cardon 2004). Un système intelligent placé dans les mêmes conditions initiales et activé par les mêmes stimuli doit produire le même résultat. Pour mettre en place des mécanismes d'intelligence dans les systèmes de production, la solution consiste à utiliser un ensemble de règles qui définissent le comportement du système et donc son intelligence. Ces règles vont réagir à l'analyse faite par le système de son état, après perception de ces stimuli.

Cette forme d'intelligence peut être mise en œuvre de manière distribuée.

- **Intelligence artificielle distribuée**

L'Intelligence artificielle distribuée (IAD) est une manière d'appliquer de telles règles. L'IAD est une branche de l'IA classique qui a déjà de nombreuses applications en Productique. Outre les mises en œuvre distribuées et/ou parallélisées de l'IA classique, elle concerne également l'étude des réseaux de neurones artificiels (RNA), la résolution distribuée et coopérative de problèmes (RCDP) et les systèmes multi-agents (SMA) (Espinasse *et al.* 1997 ; Tranvouez 2001). En fait, nous nous intéresserons ici à ce dernier sous-domaine. Là où l'IA classique permet de modéliser le comportement d'un seul agent, l'utilisation de SMA autorise le passage d'un comportement individuel à des comportements collectifs, ce qui permet d'aborder et de résoudre des problèmes complexes. L'intelligence du comportement sera alors le fruit de l'activité de plusieurs agents. Ces derniers devront obligatoirement des capacités de coopération, de coordination et de communication (Ferber 1995). Il existe deux

types d'agents permettant de concevoir deux types de SMA. Les systèmes d'agents réactifs sont constitués d'un grand nombre d'agents ayant des règles plutôt simples, de type stimuli/action, sans représentation de leur environnement ou de leur passé. Les systèmes d'agents cognitifs sont composés d'un effectif restreint d'agents ayant une bonne perception de leur environnement, pouvant tenir compte de leur passé et surtout respectant des règles relativement complexes. Dans les deux cas, un agent est une entité décisionnelle dotée d'autonomie : un agent est essentiellement un objet logiciel autonome, finalisé et capable de communiquer. Au contraire des autres types d'objets logiciels, un agent fonctionne suivant sa propre initiative. Un système d'agents est conçu pour atteindre les objectifs programmés d'avance par son concepteur. Les SMA peuvent donc être utilisés pour réaliser des systèmes de pilotage intelligents de tous types et présente de réels intérêts (Parunak 1996, Muller & Parunak 1998, Shen & Norrie 1999). Par exemple, en rendant modulaire un problème complexe, en termes de composants autonomes multiples qui peuvent agir et interagir de manière flexible sur les moyens, la technologie multi-agent est bien adaptée pour l'étude des systèmes complexes structurellement distribués et ayant des caractéristiques dynamiques (Liu *et al.* 2004, Liu *et al.* 2005). Nous les retrouvons appliqués en Robotique, par exemple en robotique mobile (Kramer & Scheutz 2007, Mes *et al.* 2008), en ordonnancement (Gozzi *et al.* 2002, Wong *et al.* 2006), ou encore en Supply Chain Management (Kwon *et al.* 2007, Li & Wang, 2007). La littérature internationale est abondante sur ces sujets. En France, nous pouvons également trouver de nombreux travaux ayant utilisé des systèmes multi-agents pour traiter des problèmes de pilotage. Sans être exhaustif, nous citerons, en ce qui concerne le pilotage d'atelier : (Daouas *et al.* 1995, Sohier 1996, Mebarki *et al.* 1996 ; Kouiss *et al.* 1997, Roy 1998, Tranvouez *et al.* 1998, Archimède *et al.* 1999, Tchikou & Gouardères 2002).

Le défi majeur d'une coordination multi-agents est de trouver une solution globale de pilotage telle que tous les agents puissent trouver les solutions qui répondent non seulement de leurs propres contraintes, mais aussi aux contraintes inter-agents (Liu *et al.* 2002). Il existe globalement deux types d'architectures de SMA : les SMA à contrôle centralisé (ou à base de tableau noir, sans communication directe entre les agents), où les agents partagent des connaissances *via* le partage d'un même espace de travail (le tableau noir), et les SMA à contrôle distribué, qui sous-entend une localisation de la connaissance, du contrôle, des compétences et des activités, et une communication directe entre agents. Dans les SMA à contrôle distribué, deux techniques existent. La technique par réseau d'acointances permet à chaque agent, qui dispose d'une table de compétences des autres agents, de choisir l'agent avec lequel il va interagir. Si cette méthode est rapide, du fait de la communication deux à deux, elle manque de réactivité. La technique par enchères fonctionne *via* un protocole d'interaction qui a pour vocation de gérer la négociation entre agents. La négociation peut être supervisée par un agent arbitre qui effectue les choix et prend les décisions que les autres agents mettent en œuvre. La négociation peut également être distribuée, et ceux sont les agents qui doivent résoudre leurs conflits de manière totalement distribuée. Toutefois, il subsiste toujours un agent observateur, animateur, facilitateur, coordinateur ou superviseur (il existe différentes terminologies, mais cela se traduit toujours par un agent de niveau décisionnel supérieur) garantissant le fonctionnement du système (c'est-à-dire capable *in fine* de prendre des décisions en cas de conflits entre agents ou en cas de non résolution distribuée du problème, grâce à des arbitrages obtenus grâce à sa vue globale du problème).

Enfin, nous voyons bien que les Systèmes Multi-Agents s'inscrivent dans une démarche distribuée qui peut se traduire aussi bien dans une approche hétérarchique multi-niveaux que dans une approche hiérarchique coordonnée ou non. A titre d'exemple, SYROCO (Roy 1998) est un SMA centralisé/hiérarchisé où l'organisation du pilotage est réalisée par un unique agent superviseur. Si nous prenons maintenant un exemple hétérarchique, (Tranvouez 2001) propose une méthode de réordonnancement basée sur la Résolution Coopérative et Distribuée de Problème (RCDP). Toutefois, cette méthode est déclenchée lors d'une perturbation de l'ordonnancement effectué au préalable par un pilotage de type hiérarchisé/coordonné et si cela échoue, c'est ce pilotage qui proposera une nouvelle solution d'ordonnancement. Par ailleurs, si l'idée d'un SMA réfère plutôt à un fonctionnement des agents en réseau, un SMA peut également être déployé sur une seule machine. C'est pour cela qu'il vaut mieux définir les SMA d'une manière générale comme étant des systèmes intelligents distribués que comme étant des systèmes hétérarchiques...

Il est à noter l'importante contribution pour la communauté scientifique des systèmes hétérarchiques que constitue la notion de protocole d'interaction. Une fondation scientifique internationale, la *Foundation of Intelligent Physical*

Agents (FIPA 2003) fédère les travaux sur ce thème, et constitue maintenant le 11^{ème} comité de normalisation de la *IEEE Computer Society*. Une dizaine de protocoles d'interaction sont intégralement spécifiés par la FIPA.

Un protocole est un automate (avec un contrôle fini) ayant la possibilité de manipuler des variables de type entier, réel et/ou mot. Le domaine de ces variables est *a priori* non borné. Le comportement des entités est donc défini par le fonctionnement du protocole de communication du système. Tous les échanges d'informations, les conversations entre les agents seront effectués selon les règles de grammaire de l'automate ; ces règles étant définies préalablement par le développeur.

Les messages et les conversations sont *a priori* déclenchés par des événements extérieurs au protocole de communication. Il permet donc de définir l'ordre dans lequel les conversations entre les agents vont s'effectuer.

Le protocole d'interaction le plus connu est ContractNet (Smith 1980) : globalement, un agent ayant un besoin émet sur le réseau un appel d'offre, et les autres agents essaient d'y répondre. C'est ce qui s'appelle un mécanisme d'enchères, représenté figure 9 selon le formalisme de la FIPA (FIPA 2002) :

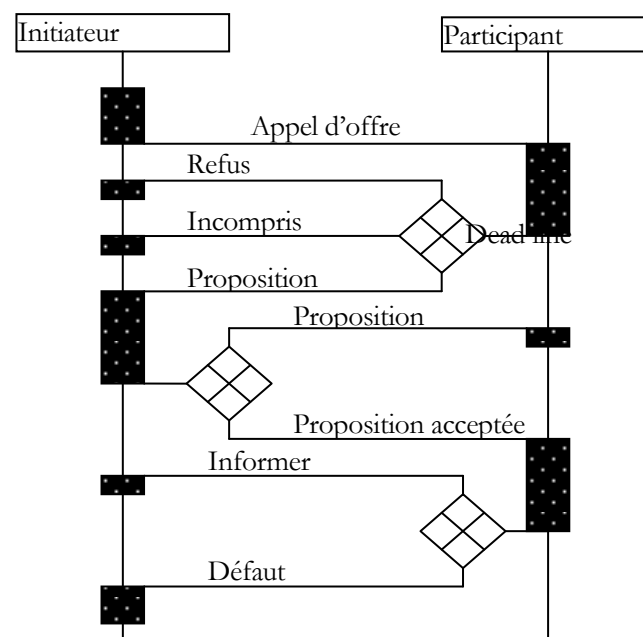


Figure 9. Le protocole Contract Net (d'après Smith 1980)

- une requête est émise par l'agent initiateur à tous les autres agents du système pouvant répondre aux exigences de celle-ci (la requête peut également être appelée appel d'offre ou appel à proposition),
- lorsque la date de fin arrive (*Dead-Line*), tous les agents participants devront renvoyer leur proposition à l'agent initiateur (il s'agit ici en fait de la capacité de chaque agent à pouvoir exécuter la tâche),
- si aucun des participants n'a répondu, l'agent initiateur doit alors soit modifier sa requête et entamer une nouvelle tentative de négociation, soit abandonner la requête,
- dans le cas où il reçoit plusieurs réponses (des offres), il va alors toutes les vérifier et donner une réponse positive ou négative aux propositions émises par chaque participant,
- il est à noter que tous les participants n'ayant renvoyé aucune réponse avant la *Dead-Line* sont considérés comme refusés.

Ce protocole présente la particularité de centraliser chaque négociation : en effet, durant la négociation d'un appel d'offre, c'est l'agent qui a émis cet appel d'offre qui supervise et contrôle l'ensemble des opérations de coopération

et de coordination.

D'autres protocoles existent, soit avec des mécanismes d'enchères montantes ou descendantes, soit avec des mécanismes de votes...

- **Produit actif et intelligence ambiante**

Depuis 2002, une composante du Programme-Cadre de Recherche et Développement de l'union européenne consacrée aux technologies de l'information porte sur le concept d'intelligence ambiante. Il s'agit de fédérer des thématiques apparemment hétéroclites, comme les nano et micro systèmes, les communications sans fils, le calcul distribué ou encore les technologies de capteurs. Un des objectifs de la convergence entre ces technologies est de fournir de nouveaux services aux usagers. Ce programme vise en effet principalement des retombées grand public. Ce concept d'intelligence ambiante, également appelé ubiquité, offre à l'utilisateur la possibilité d'interagir, où qu'il soit, avec une multitude d'appareils infotroniques interconnectés, capteurs, actuators, enfouis autour de lui et fonctionnant grâce à des réseaux *ad hoc* selon une architecture d'informatique distribuée. L'Intelligence peut être qualifiée d'Ambiente du fait de l'omniprésence d'agents informatiques non apparents et communicants sans fil.

Cette approche trouve de nombreuses applications dans le domaine des Systèmes de Production. Il existe d'ores et déjà des technologies et des applications qui bouleversent leur fonctionnement habituel. Par exemple, l'utilisation de modules GPS pour le suivi de flottes de véhicules ou de puces RFID pour le suivi des palettes. Selon Duncan MAC FARLANE (McFarlane *et al.* 2002), les conséquences de l'introduction de telles technologies dans les Systèmes de Production sont considérables. Une telle capacité permettra par exemple très rapidement des améliorations en termes de suivi des produits ambiants, ce qui induira une réduction des niveaux de stocks et une meilleure couverture de la disponibilité des produits, grâce à la fiabilité en temps réel des données produit (Rekik *et al.* 2008). À plus long terme, des avantages plus conséquents peuvent être développés pour la gestion de la personnalisation de masse (Ducatel *et al.* 2001, Huang *et al.* 2007), pour la sécurisation des produits (Dobre & Bajic 2008) ou encore pour l'organisation collaborative de la production et de la distribution (Soroor *et al.* 2008). Pour l'instant, les recherches portent sur le passage de l'usage simple des technologies infotroniques (RFID par exemple) à la notion de produit intelligent.

L'origine de ces préoccupations dans les systèmes manufacturiers est à trouver dans les recherches sur l'automatisation des techniques de suivi de la production (Udoka 1991) : la notion d'identification automatique des produits (Auto ID) a initialement été émise pour suivre les événements de production et faire de l'agrégation de données dans des architectures hiérarchiques intégrées de type CIM (Udoka 1992).

(Chaxel *et al.* 1999) ont étudié le rôle particulier qui peut être confié au produit, objet nomade disposant de son propre système d'information et sa propre capacité de décision. Une formalisation matricielle des flux d'information entre produits et ressources au sein d'une hétérarchie a été proposée par (Charpentier *et al.* 2001). Par ailleurs, dans la lignée de leurs travaux antérieurs respectifs, Daniel BRUN-PICARD (Bertrand *et al.* 1990, Brun-Picard & Baboli 1995) et Zdenek BINDER (Kallel 1985) proposent dans (Brun-Picard *et al.* 1997) la notion de produit actif dans un contexte de pilotage distribué. En fait, leur constat commun est qu'à partir du moment où, dans un système de production, des entités décisionnelles coopèrent et/ou coordonnent leurs actions pour atteindre un but commun, et cela que nous soyons dans un système de pilotage décentralisé ou hiérarchisé coordonné, alors les produits sont d'excellents vecteurs d'information (Brun-Picard 2000). La partie informationnelle de ce produit actif sera ultérieurement appelé I_produit dans (Pujo & Brun-Picard 2002), en référence aux I_machines désignant les centres de décision attachés aux équipements depuis (Brun-Picard 1988). Chaque produit physique est associé à une entité décisionnelle et informationnelle le représentant : le I_produit. Le I_produit possède d'une part la connaissance spécifique nécessaire pour rechercher et traiter l'information sur le processus de production (buts de production, règles de décision, caractéristiques des équipements et de l'environnement de production (Brun-Picard & Baboli 1995), d'autre part toutes les informations sur ses propres caractéristiques (identité, caractéristiques fonctionnelles, caractéristiques structurelles, procédés et gamme d'opération, pondération de priorité...) et également l'information sur le planning prévisionnel, l'état réel d'avancement et de qualité de sa fabrication. Ces informations propres à chaque produit s'ajoutent aux informations de la base de données locale à chaque centre de décision (une I_machine) et permettent d'affiner les décisions de ces dernières. (Broissin, 1999) a en effet montré l'intérêt de la prise en compte technique du produit dans la génération de tâches adaptatives et son rôle dans le choix dynamique

et temps réel des équipements exécutant ces tâches. (Pujo & Brun Picard 2002) proposent les concepts d'auto ordonnancement piloté par le produit ou par génération locale et contextuelle de tâches orientées métier, résultant de l'interaction produit – ressource. En ce sens, un *I*-produit n'est porteur que d'informations qu'il est capable de communiquer aux centres de décision, et c'est en cela qu'il est qualifié d'actif.

Cette définition est en cela très proche de celle fournie par (Kintzig *et al.* 2002) qui définit un objet intelligent par sa seule capacité de communication. Toutefois, cette notion d'objet intelligent a été rapidement complétée par (Mattern 2003), qui associe à la notion d'intelligence la fourniture de services, la transparence de la communication et l'adaptation à l'environnement.

Ces notions rejoignent les travaux de Duncan MAC FARLANE, qui définit la notion de produit intelligent (McFarlane *et al.* 2002) comme un objet dual (physique et virtuel), doté d'une capacité de traitement de l'information (mémorisation, communication, calcul, action...). Ceci lui permet de proposer par exemple des services de traçabilité dans le cadre de la chaîne logistique (Wong *et al.* 2002). (Cea *et al.* 2004) reprend ce concept et rappelle sa caractérisation : identification unique, communication avec l'environnement, mémorisation et gestion des informations propres, langage de dialogue et d'échange (informations et états), participation aux processus de décision le concernant durant son cycle de vie, surveillance et contrôle de son environnement. Ensuite, les auteurs listent un ensemble non exhaustif de fonctions, de ressources et d'informations associé au produit, appelé 'produit virtuel' ou 'Artefact'. Ce terme d'artefact est toutefois sujet à discussion : sous l'influence du faux ami anglophone 'artifact', nous pourrions penser que ce terme désigne tout objet produit par l'activité humaine. Or, en français, un artefact désigne un effet artificiel, rencontré au cours d'une observation ou lors d'une expérience. Souvent, cela désigne un aspect indésirable, par exemple un parasite (dans une image numérique, un artefact désigne une altération d'un visuel, c'est-à-dire un pixel Hors Service). Nous passerons sur l'usage 'image' en Science Fiction et dans la littérature fantastique, pour nous intéresser aux définitions en usage en psychologie cognitive : Artefact – système pour représenter le monde (Agostinelli 2001). Cela correspond à un modèle. Cette dernière définition n'est donc pas adéquate.

La notion d'avatar développée par Jens SCHUMACHER est en tout cas relativement similaire, même si le terme même d'avatar n'est pas forcément meilleur que celui d'artefact. Elle complète la notion de produit étendu proposée par (Thoben *et al.* 2001). Les relations entre le produit et les informations qui lui sont associées ont fortement évolué dans ces dernières années. L'évolution de l'e-business, l'e-commerce nécessite d'adapter ces concepts dans un nouveau modèle (Thoben *et al.* 2001). La figure 10 présente cette évolution : d'une gestion de l'information technique (documentation, plans, ordres de fabrication, gammes...) basée sur du papier, nous sommes passés à une gestion de ces mêmes données basée sur des systèmes d'information spécialisés en conception (CAO), en fabrication (FAO), en production (ERP)... Actuellement, ces systèmes d'information sont interconnectés entre eux, et dans le meilleur des cas, reliés au produit lui-même, par l'intermédiaire d'une technologie infotronique sans fil. Ceci permet l'identification unique du produit, qui peut communiquer avec son environnement, ainsi que traiter et stocker des informations.

Pour être compétitif sur le marché, face à la concurrence internationale rude, il faut prendre en considération l'évolution des attentes des clients : ils ne veulent plus acheter un produit, mais un service rendu. Le produit étendu, c'est la notion qui regroupe un produit et le service de plus en plus intelligent, de plus en plus en phase avec les besoins du client, qu'il doit remplir.

Selon (Hirsch *et al.* 2001), un produit étendu comprend les éléments suivants :

- une technologie de facilitateurs et de solutions résultant de développements en liaison avec le e-commerce, le e-business ou plus généralement le business multi-mode,
- la combinaison d'un produit physique avec les services associés ou les améliorations qui augmentent sa valeur sur le marché,
- des capacités d'intelligence, de personnalisation, des produits faciles à utiliser, y compris en intégrant des fonctionnalités telles que la maintenance.

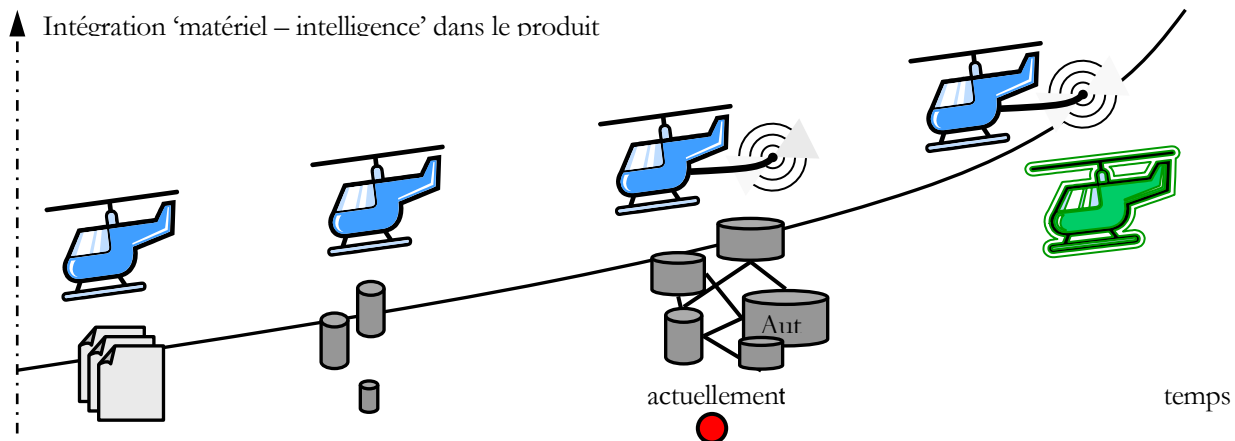


Figure 10. Évolution de l'intégration 'matériel – intelligence' (d'après Jens SCHUMACHER)

Pour offrir à la clientèle un service à valeur ajoutée associé au produit physique, ce dernier doit être associé à un composant immatériel, supportant l'information, la connaissance et composé de services, d'ingénierie, de logiciels... Selon (Hribernik *et al.* 2006), le concept de produit semi-autonome est centré sur la gestion de l'information assurée par le Produit Avatar (PA).

Ce concept permet de mettre en œuvre le concept global de production distribuée et de décentralisation de la gestion de l'information pertinente à chaque produit. Dans ce contexte, l'utilisation pragmatique des nouvelles technologies, telles que la RFID, les réseaux sans fil et l'informatique ubiquitaire permet de relier le produit à un réseau d'applications liées à la production, à la maintenance et à la réparation d'un produit.

Ce terme 'avatar' n'est pas forcément le plus heureux en France, car une des significations en français, abusive mais courante, porte des connotations négatives : évènement fâcheux, incident.

La figure 11 donne un aperçu des différentes fonctions et informations prises en charge par l'avatar et lui permettant d'assurer la coopération entre entités décisionnelles.

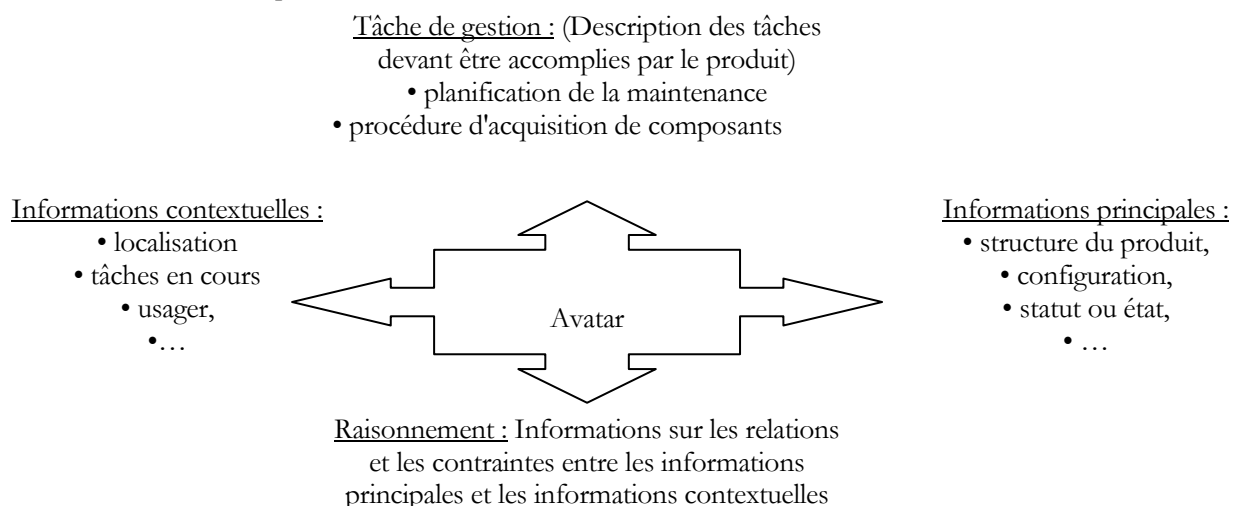


Figure 11. Fonctions de l'avatar (d'après Jens SCHUMACHER)

Toutefois, si la notion de coopération entre systèmes doit amener des solutions plus concurrentielles, les tâches de planification, de gestion et d'optimisation restent en retour beaucoup plus difficiles et complexes à organiser. Pour étudier les mécanismes de coopération, (Ding *et al.* 2004) proposent une boîte à outils orientée modélisation, simulation et optimisation. Le domaine d'application choisi est celui de l'évaluation, la conception et l'amélioration de la chaîne d'approvisionnement des réseaux d'entreprises et tient compte des considérations sociales et de l'impact environnemental ainsi que l'incertitude et des risques qui sont inhérents au sein de réseaux d'entreprises.

D'autres travaux allant dans le même sens concernent les réseaux de capteurs et d'actionneurs (De Antoni & Babau 2006) ou des applications embarquées (Gérard *et al.* 2005).

Finalement, quelque soit le nom que nous leur donnions, l'objet, artefact, produit virtuel, avatar ou autres, le futur fonctionnement des Systèmes de Production reposera sur ce type d'entités. De nouveaux paradigmes, tel l'*Ambient Intelligence* (AmI) ou l'*Intelligent Wireless Web* (IWW) vont révolutionner le fonctionnement des systèmes de pilotage. L'emploi de réseaux sans fil à haute capacité de transmission, exploitant les avancées parallèles dans le monde des e-technologies et de l'Internet (Web sémantique, Services Web, *Agent-Based Technologies*, Architectures Orientées Services), et la sensibilité au contexte ou à l'environnement, via des capteurs proprioceptifs et extéroceptifs. Compte tenu de l'énorme potentiel d'application dans les Systèmes de Gestion, un modèle innovant, fondé sur les services type AmI ou IWW, doit être proposé.

AmI est plutôt orienté vers la connectivité locale : l'acteur mobile, que ce soit un utilisateur humain dans une aire ambiante ou un produit intelligent circulant dans un atelier ambiant, doit pouvoir exprimer librement ses besoins auprès de n'importe quel périphérique, qui, dès lors qu'il possède les fonctionnalités *ad hoc*, doit pouvoir être en mesure d'y répondre.

IWW est plutôt orienté vers la connectivité globale : l'acteur mobile doit pouvoir accéder à des services ou à des données, en temps réel au fur et à mesure en fonction des besoins, quelle que soit la localisation des acteurs impliqués (agents ambiants, base de données, fournisseurs de services...). A cet égard, les problèmes de connexion, de transmission et de réseaux de communication avec ou sans fil doivent devenir totalement transparents et instantanés.

Les protocoles issus des SMA sont inadéquats : il faut avant toute autre affaire se connecter, puis identifier les services disponibles.

Plusieurs méthodes ont été proposées (Duda 2003), en fonction que la gestion soit centralisée (enregistrement dans une table) ou distribuée (à base de messages échangés), et que nous soyons dans une démarche d'offre de services (*push*) ou de demande d'un service (*pull*). La figure 12 montre un protocole '*centralized pull*' (Cea *et al.* 2004).

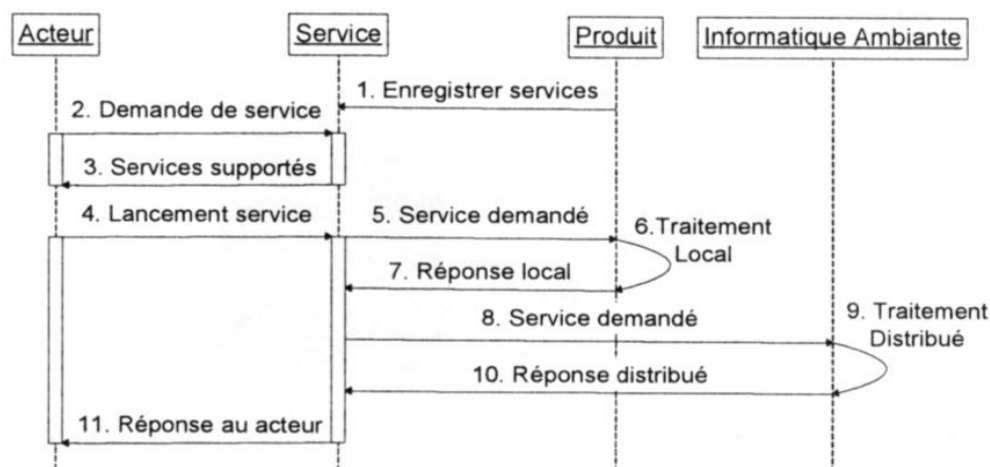


Figure 12. Le protocole '*centralized pull*' (d'après Cea *et al.* 2004)

Un verrou scientifique majeur réside dans la définition de protocoles d'interaction permettant à ces entités logicielles ambiantes de non seulement répondre aux requêtes qu'on leur pose selon leurs fonctionnalités mais aussi de prendre des initiatives lorsqu'elles n'en sont pas capables. (Charif & Sabouret 2006) proposent déjà la spécification d'un tel protocole qui dote en outre les agents d'une propriété de composition leur permettant de réaliser collectivement une tâche que chacun ne pourrait accomplir seul. Cette propriété, éminemment adaptative et dynamique, reste à transposer dans le monde des Systèmes de Production, par exemple sous la forme d'un travail de traitement automatique des chevauchements de lots ou de leur fractionnement.

1.5. Systèmes holoniques manufacturiers

Depuis une vingtaine d'années, beaucoup de paradigmes en Productique ont été proposés de relever les défis actuels du monde internationalisé de la production : intégration de systèmes industriels hétérogènes, interopérabilité et distribution des organisations, agilité du pilotage (flexibilité, réactivité, tolérance aux fautes...). Cela résulte de la grande activité scientifique suscitée par l'initiative mondiale '*Intelligent Manufacturing System*'. En effet, un consortium international s'est mis en place au début des années 90, en fédérant des équipes de recherche venant de très nombreux pays, afin d'anticiper l'évolution de la production manufacturière et d'imaginer et d'explorer des solutions innovantes.

Parmi les six cas test des études de faisabilité conduites dans le cadre IMS, l'un d'entre eux doit retenir toute notre attention : il s'agit du projet HMS, consacré à l'étude des *Holonic Manufacturing System*.

Les HMS doivent leur existence au concept de 'holon', formulé par le philosophe hongrois Arthur KOESTLER en 1967 : un 'holon' est une partie identifiable d'un système ayant une identité unique, mais qui pourtant se compose de pièces subalternes et qui est également une partie d'un plus grand ensemble (Koestler 1967).

A priori, cette définition pourrait faire penser à celle d'un système : en effet, un système peut être décomposé en sous systèmes, qui sont eux-mêmes des systèmes à part entière. Toutefois, le modèle OID spécialise les sous systèmes d'un système (Le Moigne 1977), ce qui ne favorise pas la généralisation de cette décomposition. Par ailleurs, cette approche de la modélisation d'un système est centrée sur ce qui se passe à l'intérieur du système : elle ne permet pas de décrire la part décisionnelle que peut avoir un système sur un système d'ordre supérieur. En cela, la théorie du système général n'est donc *a priori* pas vraiment adaptée à la modélisation de certains systèmes si on souhaite se démarquer des approches de type 'maître-esclave' ou 'hiérarchique'.

C'est en cela que l'approche d'Arthur KOESTLER trouve tout son intérêt. Arthur KOESTLER, via la théorie des hiérarchies, rejette les courants classiques de la sociologie scientifique, tels que le behaviorisme – doctrine de la psychologie basée sur l'étude des comportements visant à l'établissement de lois constantes à partir d'observations – et l'holisme – doctrine épistémologique qui ramène la connaissance du sous-système à celle du système auquel il appartient. Il propose dans (Koestler 1967) de revisiter la notion de décomposition hiérarchique des systèmes (*Open Hierarchical Systems Theory*) : tout système doit être observé comme une hiérarchie multi niveau de sous-ensembles semi-autonomes formant des arborescences verticales et des réseaux horizontaux (figure 13).

L'élément de base de cette approche est effectivement appelé 'holon', néologisme créé à partir du grec '*holos*', le tout, et du suffixe '*on*', désignant une particule élémentaire. Ce holon, qui peut représenter un système, est à la fois l'expression des propriétés du système qu'il représente – c'est-à-dire qu'il est un tout cohérent et autonome –, mais aussi de celles relevant du système auquel il appartient – c'est-à-dire qu'il est une partie d'un tout au fonctionnement duquel il contribue.

L'approche holonique peut s'appliquer à toutes sortes de systèmes : des systèmes naturels – biologiques, par exemple – et des systèmes artificiels – c'est-à-dire créés par l'homme.

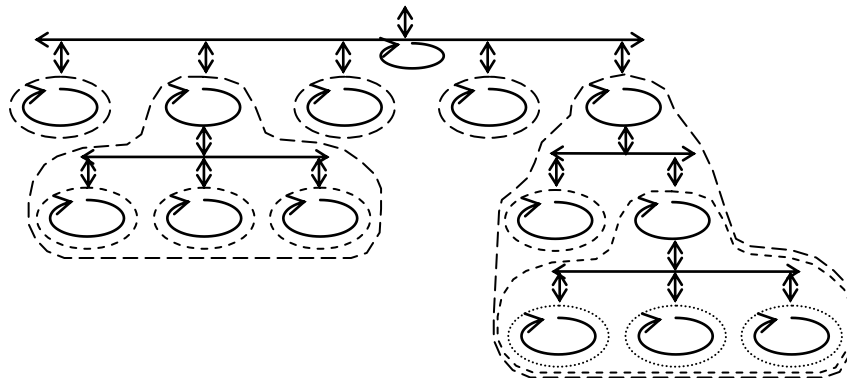


Figure 13. Modèle hiérarchique d'un système holonique

Ces deux aspects du holon sont fondamentaux, car il montre la dualité fondamentale, au niveau fonctionnel et au niveau comportemental, d'un holon vis-à-vis d'un simple système. C'est ce qu'Arthur KOESTLER appelle l'effet Janus, du nom de la divinité romaine à deux visages, regardant dans deux directions opposées (Koestler 1978).

Le premier de ces aspects confère au holon l'identité propre d'un tout autonome, c'est-à-dire existant par lui-même (*Self-Assertative tendencies*). Par ailleurs, le holon se trouve être une partie intégrée dans un tout (*Integrative tendencies*). Sur ce second aspect, l'intelligence associée au holon doit lui permettre de contribuer pour une partie au fonctionnement global du système. En fait, le concept de holon permet de représenter de manière relativement souple diverses configurations architecturales, selon l'équilibre relatif entre tendances *Self-Assertative* et *Integrative*. Cela va des architectures purement hiérarchiques à des architectures hétérarchiques, avec un intérêt prépondérant pour ces dernières, qui constituent le lieu commun des organisations biologiques et sociales étudiées par Arthur KOESTLER.

Le projet HMS a donc consisté à étudier l'applicabilité des concepts proposés par le paradigme holonique au domaine de la production industrielle de biens manufacturés. Cette étude était motivée par différents verrous et enjeux dans le domaine des sciences de l'organisation industrielle (Suda 1989, Suda 1990) :

- dès le début des années 90, l'évolution d'une production de masse à une personnalisation de masse est actée, pour répondre à une demande de plus en plus diversifiée dans des conditions économiques acceptables,
- le modèle de l'entreprise auto suffisante (au sens où elle n'a pas besoin de collaborer avec d'autres entreprises pour élaborer ses produits) va progressivement laisser la place à un modèle d'entreprise collaborative (au sens où elle fait équipe avec d'autres), afin d'accélérer le développement de nouveaux produits, de réduire les risques ou encore de pénétrer des marchés locaux,
- dans une telle approche, l'efficacité de la production va devenir aussi importante que son efficacité, et la fonction coordination devient contrainte par de nouveaux objectifs, tels que la flexibilité, la tolérance aux pannes,
- les solutions centralisées de contrôle et de pilotage ne sont pas appropriées pour de telles approches.

Dans un HMS, les activités de chaque holon sont issues de la coopération qu'il entretient avec les autres holons, par opposition à toute autre solution où elles seraient imposées par un mécanisme de décision centralisé. C'est cette révolution conceptuelle qui est en fait l'objet des études scientifiques du projet HMS.

Dans un premier temps, les définitions spécifiques au domaine de la production manufacturière ont été collectivement élaborées. Nous pouvons ainsi définir (Uliuru 1997, Van Leuwen & Norrie 1997) :

- *Holon* : c'est un module autonome et coopératif, élément d'un système de fabrication pour transformer, transporter, stocker et/ou valider des informations et/ou des objets physiques. Le holon se compose d'une partie

‘traitement de l’information’ et souvent d’une partie ‘physique’ faisant l’objet d’un traitement. Un holon peut faire partie d’un autre holon.

- *Autonomie* : c’est la possibilité pour une entité de créer et de contrôler l’exécution de ses propres plans et/ou stratégies.
- *Coopération* : c’est un processus par lequel un ensemble d’entités développe mutuellement les plans acceptables et exécute ces plans.
- *Holarchie* : c’est un système de holons qui peuvent coopérer pour atteindre un but ou un objectif donné. Une holarchie définit les règles de base pour la coopération des holons et limite de ce fait leur autonomie (Wyns *et al.* 1997).
- *Holonic Manufacturing System (HMS)* : c’est une holarchie qui intègre l’ensemble des activités de production, de l’anticipation des commandes par la conception à la réalisation des ventes.
- *Attributs holoniques* : Ce sont les caractéristiques qui font d’une entité un holon. L’ensemble minimum de ces attributs est constitué de l’autonomie et de la coopération (Bongaerts *et al.* 1996, Markus *et al.* 1996, Bongaerts *et al.* 2000, Morel *et al.* 2003).

A partir de ces définitions, les HMS peuvent être considérés comme une manière unifiée pour aborder la commande hiérarchique d’une quelconque unité de production, du procédé opérationnel de production au niveau global de l’entreprise (Bongaerts *et al.* 2003). En effet, nous pouvons en déduire l’idée qu’un holon est récursif, au sens qu’un holon, appartenant à une holarchie, peut lui-même être une holarchie, qui se comportera comme une unité autonome et coopérative dans la première holarchie. Ceci a déjà été représenté dans la figure 13 et est à distinguer de la notion classique de hiérarchie, que nous pouvons éventuellement retrouver dans une holarchie : il peut subsister un lien de subordination entre un holon et un autre holon de plus haut niveau, qui lui donne des instructions ou le commande. Ces deux holons ne sont pas nécessairement liés par une relation de récursivité, même si souvent, les liens hiérarchiques au sein d’un système sont calqués sur la décomposition fonctionnelle de ce système. Cela dit, les holons doivent privilégier des modes de fonctionnement autonomes, et à ce titre, ils doivent pouvoir prendre des décisions relatives à leur propre niveau d’existence : un holon doit contribuer aux prises de décision qui le concerne.

Enfin, le fonctionnement d’un HMS sera caractérisé à la fois par une grande réactivité et une grande stabilité. La réactivité, qui caractérise l’aptitude d’un système à fournir rapidement une réponse appropriée, résulte de la plus grande autonomie des holons composant l’holarchie. C’est le holon directement au contact d’une difficulté qui va immédiatement essayer de résoudre cette difficulté. La stabilité provient des règles de décision attachées à chaque holon, avec l’objet de le doter de capacités d’autonomie fortes. Ainsi, la tolérance aux pannes d’un HMS illustre parfaitement ce propos : la panne d’un holon va être immédiatement constatée et prise en considération : le holon ne participe plus au fonctionnement global. Cela dit, cela n’aura qu’une très faible incidence sur le fonctionnement global : pas de blocage, bien entendu, mais au contraire une compensation par les autres holons, qui vont absorber une partie du dysfonctionnement engendré.

Pour remplir ces différents objectifs, les différentes fonctionnalités d’un holon doivent être identifiées et organisées. James CHRISTENSEN (Christensen 1994) proposa assez rapidement un modèle général d’architecture d’un holon qui demeure toujours d’actualité (figure 14).

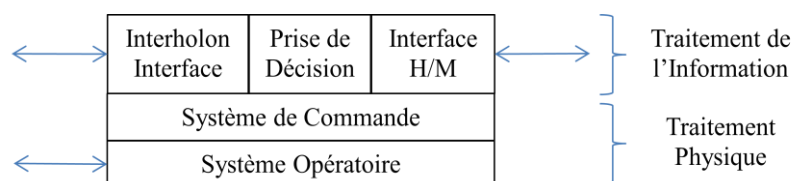


Figure 14. Architecture générale d’un holon (d’après (Christensen 1994))

Ce modèle montre les deux composants principaux d'un holon selon cette architecture : une partie 'Traitement de l'Information' et une partie 'Traitement Physique'. A noter que cette dernière est présentée comme facultative, certains holons pouvant n'être que des centres de décision.

La partie 'Traitement Physique' est subdivisée en un système de commande et un système opératoire. La partie 'Traitement de l'Information' comporte 3 modules :

- un module de prise de décision, qui est le cœur du holon, confère au holon ses capacités de raisonnement et d'autonomie,
- un module d'interface inter holons, pour la communication et l'interaction avec les autres holons,
- un module d'interface homme-holon, pour assurer le dialogue avec les opérateurs.

En cela, il est à remarquer que le concept de holon est tout à fait compatible avec le modèle canonique OID, mais appliqué localement au niveau de chaque holon, sans idée de récursivité : un holon intègre les aspects immatériels (information et décision) et les aspects matériels (objet physique réel).

Ce modèle de holon a le mérite de poser extrêmement simplement les grandes lignes de la composition d'un holon et celles de son fonctionnement. La majeure partie des nombreux travaux ultérieurs sur les systèmes holoniques respecte ce modèle, et en sont des interprétations beaucoup plus détaillées qui :

- spécifient les différents types de holons présents dans la holarchie,
- définissent leur rôle et par conséquent leurs relations et leurs modes d'interaction,
- décrivent les architectures fonctionnelles et organisationnelles correspondantes,
- expliquent enfin les processus de prise de décision utilisés.

Devant le très grand nombre de travaux effectués dans le cadre ou autour du projet HMS sur les systèmes holoniques, il est impossible d'inventorier finement tous ces travaux. Le point commun entre ces travaux est la rupture avec les modèles hiérarchiques antérieurs, où les comportements sont du type 'maître – esclave' selon une topologie arborescente et invariante des centres de décision, le tout renforcé par le respect des ordres par le centre de décision esclave. En effet, le holon a une intelligence décisionnelle qui lui permet d'agir sur son propre comportement, mais qui lui permet également d'intervenir sur le comportement du système auquel il appartient. En d'autres termes, un holon a l'autonomie suffisante pour créer et contrôler l'exécution de ses propres plans, et il peut coopérer avec d'autres holons pour développer des plans mutuellement acceptables, afin de réaliser un objectif global à tout le système de production. La décomposition hiérarchique est remplacée par la récursivité des holons et la mise en œuvre de l'effet Janus. Ceci permet une large latitude pour la mise en œuvre du système de pilotage, selon une architecture hétérarchique au sens large (Trentesaux 2002), c'est-à-dire pouvant mixer des organisations centralisées et/ou non centralisées.

En fait, pour conclure sur les généralités concernant le paradigme holonique, il est possible d'y observer dans une holarchie 2 types de relations inter holoniques :

- des relations directes, de holon à holon, où un holon est habilité à répondre aux questions d'un autre holon, même si la réponse est non-coopérative,
- des relations collectives entre plusieurs holons, afin d'atteindre par coopération un objectif commun et complexe, par exemple, convenir d'un plan commun pour résoudre un problème distribué.

Ces 2 possibilités ouvrent de larges perspectives en termes :

- de mise en place de mécanismes décisionnels,
- d'organisation de la prise de décision, via l'architecture choisie (Bongaerts *et al.* 2000).

Nous allons donc nous attacher à présenter les travaux les plus connus et reconnus, ainsi que quelques travaux également forts intéressants. Nous présenterons une synthèse globale qui montrera, à partir d'un panorama des différents types de holons, d'interactions, d'architectures et de mécanismes de prises de décision, quelles sont les tendances les plus couramment rencontrées.

- **PROSA (Product, Resource, Order, Staff Architecture)**

Parmi les différentes architectures holoniques qui sont proposées dans la littérature scientifique sur les HMS, PROSA (Van Brussel *et al* 1998) est la plus connue et la plus adoptée. PROSA est un acronyme signifiant Product, Resource, Order, Staff Architecture. Ses auteurs la qualifient d'architecture de référence pour les HMS, et il semble bien que la communauté scientifique lui reconnaisse ce caractère, puisque la référence « (Van Brussel *et al* 1998) » est citée plus de trois cent fois parmi les articles scientifiques traitant des HMS et publiés dans des revues internationales avec facteur d'impact, très largement en tête des citations vis-à-vis du second papier classé (source : scopus). Ces travaux étaient annoncés dès (Valckenears *et al.* 1995) et ont été conduits dans l'équipe *Production Engineering, Machine Design and Automation* (PMA) du département d'ingénierie mécanique de l'Université de Louvain (Belgique).

PROSA comporte trois holons de base (figure 15), qui permettent de décrire une holarchie dans le domaine de la production manufacturière. Un holon de base doit assurer la gestion de données qui lui sont propres (modèle d'état), la mise en œuvre de fonctions spécialisées qui lui permettent de relever les attributions qui sont de sa responsabilité (contribution au comportement individuel - *Self-Assertative tendencies*) et enfin être capable d'assurer (contribution au comportement collectif - *Integrative tendencies*)

Ces holons de base sont :

- le Holon Produit (HP) contient le modèle du produit, c'est-à-dire ses caractéristiques physiques, telles qu'elles sont issues de la CAO (conception assistée par ordinateur) ainsi que son processus de fabrication, issu de la phase d'industrialisation (fabrication assistée par ordinateur), c'est-à-dire la connaissance nécessaire pour assurer sa fabrication (description suffisante du processus d'obtention) assurant une qualité suffisante (relations conditionnelles entre les caractéristiques physiques (dimensions, tolérances, états de surface...) et le processus choisi (capacité, rugosité...) en vue de la validation métrologique.

Le Holon Produit agit en tant que serveur de l'information pour les autres Holons du HMS, mais ne contient pas un modèle d'état du produit : il ne correspond pas à une instance donnée de produit, mais plutôt à une description de référence pour un type donné de produits.

- le Holon Ressource (HR) contient une partie physique, à savoir l'équipement de production, et une partie de traitement de l'information qui commande l'équipement et contient des méthodes de gestion de capacité et d'allocation des ressources qui permettent d'en assurer la conduite.

Au niveau des données, un Holon Ressource maintient des informations statiques et dynamiques, sur ses possibilités (liste de produits), ses tâches courantes (état et mode de fonctionnement), ses ressources secondaires (outillage...), et un état de ses activités.

Quelques exemples de fonctions assumées par un Holon Ressource sont d'accepter ou de rejeter une tâche, de commander l'exécution du processus, de surveiller le processus...

- le Holon Ordre (HO) représente une tâche dans le système de production. Il est responsable de l'exécution du travail assigné dans les temps impartis. Il contrôle le produit physique, le modèle d'état de produit, et gère le traitement de l'information logistique lié au travail.

Le Holon Ordre maintient donc les données relatives à l'état du produit physique, l'état d'avancement dans le processus de traitement de la tâche, et des données historiques concernant les tâches.

Il peut donner des instructions du type « suspendre », « commencer », « arrêter ».

Ces holons sont implémentés en utilisant des concepts orientés objet tels que l'agrégation et la spécialisation.

L'agrégation permet de décrire des compositions fonctionnelles de holons qui, ainsi regroupés, forment alors un holon de niveau fonctionnel plus élevé. La figure 15 nous montre une agrégation de ressources : par exemple, un ensemble de holons 'équipement' compose un holon 'poste de travail', un ensemble de holons 'poste de travail' compose un holon 'atelier', et un ensemble de holons 'atelier' compose un holon 'usine'. Tous ces holons sont des holons ressources.

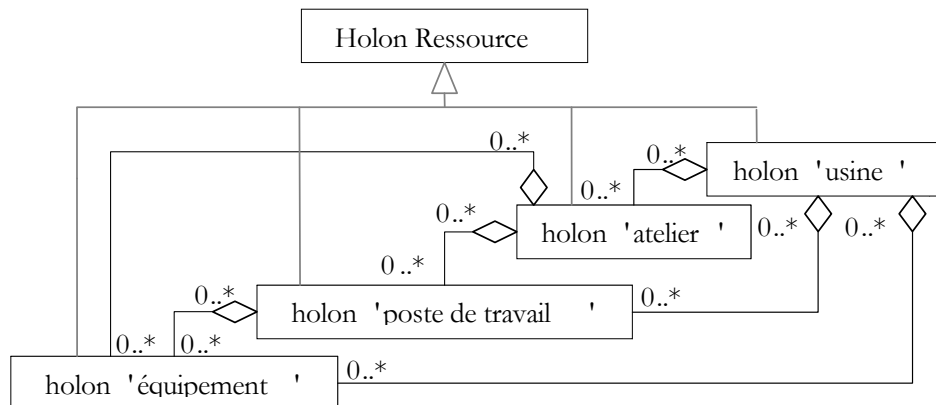


Figure 15. Agrégation de holons ressources (d'après (Van Brussel *et al.* 1998)).

La spécialisation permet de différencier les holons d'un même type en sous catégories qui partagent des caractères communs. Ainsi, un holon 'équipement' de type 'Machine Outil à Commande Numérique' peut être spécialisé en holon 'centre d'usinage', en holon 'centre de découpe laser', en holon 'centre de découpe à jet d'eau', ... (figure 16). Il s'agit en fait de la possibilité de créer une taxinomie, avec héritage de propriétés (données, méthodes...).

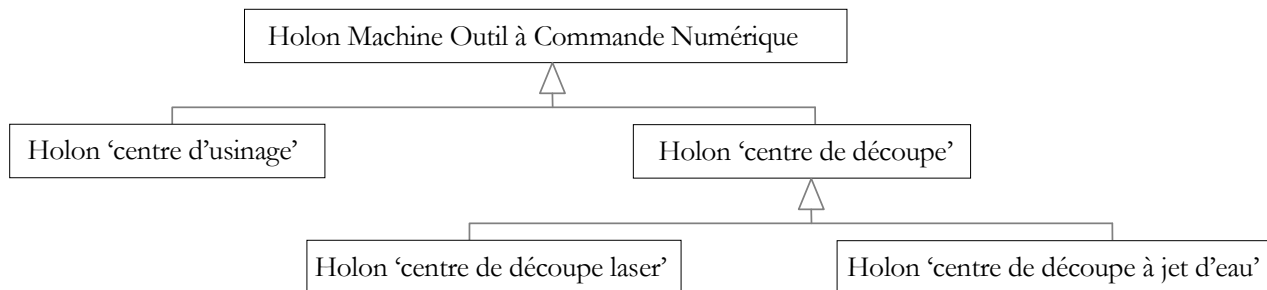


Figure 16. Spécialisation de holons ressources.

Il est à remarquer qu'il ne faut pas confondre ces compositions-décompositions fonctionnelles avec l'architecture du système de commande : dans les HMS, ces 2 aspects sont totalement dissociés alors que dans une approche classique de la commande, l'architecture est généralement calquée sur la décomposition fonctionnelle : l'entité de niveau supérieur commande les entités la constituant.

Dans un HMS, un holon de niveau supérieur constituant une holarchie, par exemple un holon 'atelier', ne commande pas nécessairement les holons de cette holarchie, mais il peut le faire, ou se contenter d'apporter une contribution à l'élaboration des commandes, ou encore ne pas s'en mêler du tout et être en dehors de toute interaction.

En fait, la génération des commandes du système de production se fait en fonction de la connaissance qui émerge des interactions entre holons. La gestion de la connaissance relative à la production résulte des interactions entre les 3 types de holons de base (figure 17) :

- les interactions HP-HR donnent la connaissance du processus : méthodes d'exécution des ressources, capacité, qualité atteignable et résultats possibles...,
- les interactions HP-HO indiquent la connaissance de la production : descriptif des lots (quantités à livrer, référence du produit, échéancier de livraison...),
- les interactions HR-HO apportent la connaissance du processus d'exécution : suivi de l'exécution des processus sur les ressources 'surveillance de la progression, de l'interruption du processus...).

Chacun de ces trois types d'interactions relèvent de sous holarchies spécialisées et concernant chacune les holons devant coopérer. Ce sont ces interactions qui sont à l'origine des commandes du HMS.

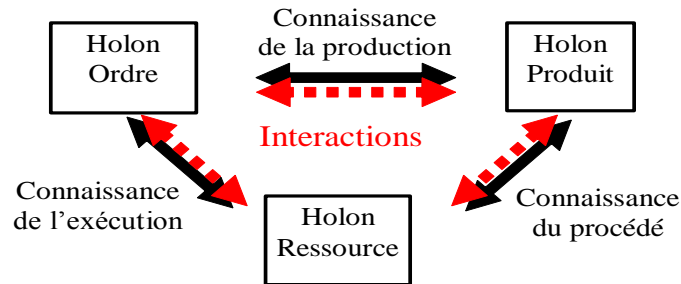


Figure 17. Holons de base et connaissance associée (d'après (Van Brussel *et al.* 1998)).

Les mécanismes de décision, qui permettent de gérer de telles interactions et de contrôler les coopérations qui en découlent, sont des protocoles d'interaction, dont un large type de variétés a été recensé par la *Foundation for Intelligent Physical Agents* (FIPA 2003). PROSA utilise le protocole 'ContractNet' (Smith 1980, FIPA 2002) au sein de ses holarchies. D'autres mécanismes de décision peuvent être implémentés, comme par exemple une approche stigmergique pour l'optimisation du routage (Verstraete *et al.* 2008).

Toutefois, il se peut que cette coopération ne soit pas suffisamment efficace. Aussi, PROSA prévoit la possibilité d'utiliser des Holons Staff pour aider les Holons de base dans l'exécution de leurs tâches, pour résoudre des situations de blocage ou rechercher une optimisation. Les Holons Staff n'ont pas de pouvoir de décision, mais peuvent proposer une solution globale pour résoudre un problème en fonction des données qui leur sont transmises par les Holons de base, qui restent responsables de la prise de décision finale. Toutefois, l'usage des Holons Staff reste très proche des comportements hiérarchiques, dans la mesure où la proposition de solutions est élaborée de manière centralisée par le Holon Staff, selon des techniques somme toute très conventionnelles. (Van Brussel *et al.* 1998) cite d'ailleurs, comme exemples de Holon Staff des holons 'ordonnanceur' ou des holons 'MRP'. Ensuite, cette solution sert de base comme programme prévisionnel que vont essayer d'exécuter les holons de base, comme dans une solution distribuée classique.

Le Holon Staff n'a donc pas de relations directes avec un Holon Produit : en effet, ce dernier n'est qu'un serveur d'information (Van Brussel *et al.* 1998) et n'intervient pas dans le processus d'exécution de la production. Ceci peut être illustré via le méta modèle proposé figure 18 :

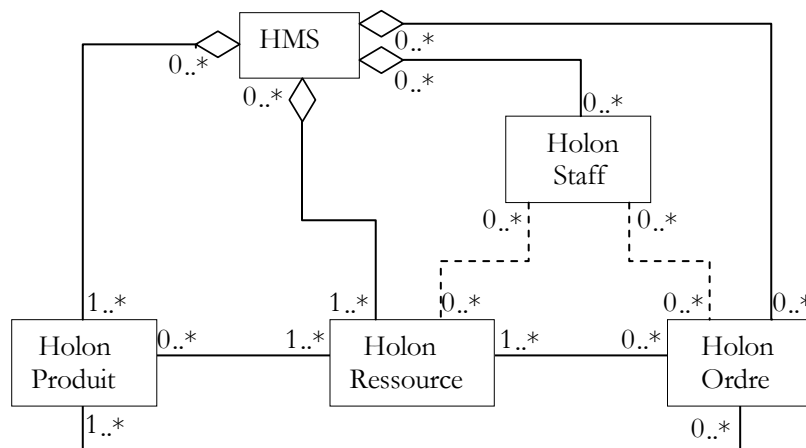


Figure 18. Méta modèle des Holons dans PROSA.

Lorsque les interactions HR-HO ne suffisent plus pour apporter une solution de pilotage satisfaisante, un Holon Staff de type holon ‘ordonnanceur’ se joint à la holarchie traitant du processus d'exécution et apporte ses propres connaissances. Les Holons Ressource lui annoncent leur capacité, les Holons Ordre lui annoncent quant à eux la charge de travail. Le holon ‘ordonnanceur’ propose alors un ordonnancement des ordres et des ressources. Rien n’indique dans PROSA avec quelles règles et contraintes est réalisée cette tâche, qui décide du choix de ces règles ni si elles ont un caractère d’optimisation. Ce Holon Staff n’a en tout cas pas un rôle de décideur, mais tant que le plan d'exécution qu’il indique fonctionne, c’est-à-dire tant qu’il ne survient pas de perturbations venant remettre en cause la pertinence de ce plan, les Holons Ressources et les Holons Ordre n’ont aucune raison de ne pas suivre ce plan. En fait, ce n’est pas un contrôle hiérarchique forcé, de type ‘maître-esclaves’, avec une trajectoire de fonctionnement imposée, mais c’est un mécanisme de contrôle pseudo-hiérarchique par adhésion volontaire, d’un type qu’on pourrait qualifier de ‘consultant-clients’, avec une certaine latitude vis-à-vis d’une trajectoire indiquée. En fait, à l’aide du Holon Staff, qui n’a pas de caractère obligatoire, PROSA permet d’exprimer toute l’étendue des organisations décisionnelles qu’offre les HMS : le Holon Staff permet de mixer des prises de décision hiérarchiques à des prises de décision collaboratives, ce qui en fait caractérise les organisations à architecture hétérarchique des systèmes de commande.

• MetaMorph

Parmi les travaux portant sur l'*Intelligent Manufacturing*, ceux de l'Université de Calgary (Canada) font partie des tout premiers points de vue scientifiques sur les HMS ayant fait l'objet de publications. Initialement, l'approche proposée, l'architecture MetaMorph, relève plutôt du paradigme Multi Agent, mais emprunte rapidement certains concepts au paradigme holonique. Plusieurs versions de ces travaux ont vu le jour, parfois même de manière conjointe.

MetaMorph I (Maturana & Norrie 1996, Maturana & Norrie 1997, Maturana *et al.* 1999) et MetaMorph II (Shen & Norrie 1998) sont des architectures holoniques qui utilisent une fédération d'agents centrée sur une approche ‘médiateur’. Elle permet, dans un système de contrôle-commande pour un système de production, de gérer le changement d'architecture décisionnelle, le changement de structure organisationnelle et même le changement d'activité de production, afin de s'adapter dynamiquement aux nouvelles tâches et aux évolutions de l'environnement. Il s'agit d'ailleurs là de l'origine du terme ‘metamorph’ : un système doit s'adapter continuellement en fonction des nouvelles conditions qu’il perçoit. Cette préoccupation centrale dans MetaMorph provient de l'observation suivante : l'utilisation d'une structure décisionnelle hiérarchique peut conduire à une vision trop rigide de la prise de décision, qui devient fragile si un seul point du fonctionnement est en échec, avec des conséquences potentiellement globales de dysfonctionnement. Seule une approche distribuée permet une robustesse face aux perturbations de toutes nature et aux évolutions de la production.

MetaMorph se veut correspondre à tous les aspects d'un pilotage holonique :

- un fonctionnement en temps réel, c’est-à-dire respectant les contraintes matérielles et logicielles,
- une organisation distribuée, c’est-à-dire ayant un fonctionnement collectif cohérent et déterministe (maîtrise des délais de communication et des modes de prise de décision),
- une progression du système fondée sur l'occurrence des événements, qui induisent la dynamique du système, à tous ses niveaux de décision (du plus bas (composant automatisé) au global (planification de l'entreprise),
- un comportement intelligent, basé sur l'autonomie, la coopération, la réactivité, la négociation et la reconfigurabilité dynamique.

MetaMorph offre une garantie des performances (grâce aux mécanismes de coordination inspirés des systèmes de pilotage hiérarchiques) et une grande robustesse contre les perturbations (grâce à une structure de pilotage hétérarchique).

La mise en œuvre de MetaMorph se fait initialement *via* des systèmes multi agents. Il existe alors 2 types d'agents :

- les agents ressources, qui représentent des équipements de fabrication ou des produits,
- les agents médiateurs, qui sont utilisés pour coordonner les interactions entre les autres agents.

Cela dit, les agents ressources de type 'produit' ne sont pas vraiment détaillés dans la littérature.

La dynamique de l'architecture MetaMorph est obtenue au travers des concepts de regroupement, de clonage, et d'apprentissage. Le regroupement consiste à la réunion dans un cluster de plusieurs agents concernés par un même problème de coordination. Le clonage signifie que la création des agents nécessaires se fait par réplication d'agents existants. Ceci assure que les entités en interaction sont standards et que leur comportement est bien déterministe. L'apprentissage est un concept qui s'applique uniquement aux agents médiateurs, et leur permet de capitaliser de l'expérience. L'auto organisation en ligne du système distribué peut être obtenue par des techniques de logique floue (Ulieru *et al.* 2000).

Le modèle générique d'un agent médiateur est donné en figure 19 :

Niveau global de l'Entreprise				
Spécification et conception du produit	Organisation virtuelle			Planification et ordonnancement
	Dynamique		Statique	
	Cluster	Clonage	Organisation	
Exécution				
Commande	Périphériques		Modèles virtuels	Simulation
Apprentissage				

Figure 19. Modèle générique d'un agent médiateur (d'après (Maturana *et al.* 1999)).

En fait, l'ensemble des agents médiateurs constitue le support des prises de décision : les agents médiateurs coordonnent les activités du système holonique. Cette coordination implique trois phases principales : l'identification des tâches et sous-tâches à exécuter, la création de communautés virtuelles d'agents (ou clusters) et l'exécution des tâches (jusqu'aux niveaux les plus bas du contrôle - commande).

Les agents médiateurs réalisent des actions de contrôle et de médiation sur les agents sous son contrôle (ceux qui sont dans le cluster dont il assure la coordination, et qui peuvent être eux même des agents médiateurs).

Un agent médiateur commence donc par diffuser, plus exactement par broadcaster, un message décrivant la tâche à résoudre. Chaque agent analyse la tâche et prépare une offre pour aider l'activité de planification ou pour rejeter la mission. Les agents, un par un, renvoient leur offre au médiateur. À ce stade, la coordination des messages est essentielle pour maintenir la stabilité de la décision du groupe et compléter le processus de planification. Le médiateur reçoit les messages, les analyse et soit intègre leurs agents respectifs dans le groupe, soit exclue du cluster les agents incompatibles. Lors d'une demande d'un agent, le mécanisme décisionnel l'analyse, puis recherche les récepteurs *ad hoc* avec ce message, et enfin annonce le message au cluster d'agents choisi. La prise de décision finale du groupe relève alors des échanges de coordination entre les agents restant au sein du cluster. Si un cluster a trop d'agents, les règles suivantes permettent d'améliorer la coordination intra-agent :

- le médiateur régule le nombre de messages à échanger, en fonction de priorités ; plus il y a d'agents, plus la sélection des messages est stricte.
- des tables de coût réglementant l'échange de messages sont mises en œuvre pour donner la priorité aux communications inter agents,
- lorsque le nombre des agents est réduit (les agents eux-mêmes se sont rejetés progressivement de la négociation), le médiateur relaxe la sélection des messages.

Ce principe initial de fonctionnement a été rapidement complété par l'utilisation de la norme IEC 61499 (Zhou *et al.* 1999, Zhang *et al.* 2000). Cette norme, portée en partie par les membres du consortium Holobloc (dont James CHRISTENSEN est l'un des principaux acteurs – www.holobloc.com), spécifie des *Function Blocks* (FB) permettant la prise en charge de périphériques intelligents de contrôle-commande (entrées (capteurs) / sorties (actionneurs)) mis en réseau et fonctionnant à l'aide d'un système d'exploitation distribué (DCOS : *distributed controller operating system*). En fait, au sein de l'IEC (*International Electrotechnical Commission*), le comité technique n°65 (TC65) s'était donné comme objectif de normaliser l'usage de modules pour des systèmes distribués de contrôle – commande pour

processus industriels. La différence est que dans le cas de systèmes distribués les FB ne sont plus considérés comme étant des éléments de programme appartenant à un automate centralisé, mais comme des éléments d'applications réparties sur un ensemble de contrôleurs distribués. Il s'agissait de réaliser une synthèse entre l'IEC 61131-3, concernant les langages de programmation des automates programmables industriels, et l'IEC 61804, concernant l'EDD (*Electronic Device Description*). Ceci était motivé au début des années 90 par la complexité croissante des systèmes de fabrication intelligents, combinant simultanément flexibilité opérationnelle et robustesse aux défaillances sur des procédés de production. Cela suppose d'apporter des solutions à un ensemble de problématiques liées notamment à la planification de l'exécution, la gestion des communications entre les différents contrôleurs, la garantie des temps de réponse, la définition de la logique de contrôle sous forme de machine d'état, mais également la réutilisabilité, la maintenabilité...

Cela a permis le développement d'une technologie naissante : la norme IEC 61499 se base sur la notion de *Function Blocks* (FB) et formule un ensemble de recommandations concernant la bonne utilisation qui doit être faite de ce concept pour la construction de systèmes de contrôle distribués robustes et réutilisables.

Un *Function Block* (figure 20) est un module réactif réalisant une ou plusieurs fonctionnalités. Il est constitué de variables internes et d'algorithmes. Les composants communiquent entre eux par des signaux. Un FB type basique est défini en déclarant :

- une interface, qui définit statiquement les variables d'événements en entrée et en sortie, ainsi que les variables de données typées en entrée et en sortie,
- l'ensemble des algorithmes supportant les fonctionnalités du FB, exprimés dans un des langages normalisés (IEC 61131-3),
- un '*Execution Control Chart*' (ECC), qui est un automate à états contrôlant l'invocation des algorithmes correspondant à chacun des états.

Les conditions sur les transitions portent sur les occurrences d'événements en entrée et les variables d'entrée. La composition des différents FB se fait au travers du "*Function Block Diagram*" (FBD). Ce diagramme décrit les flux de données et d'événements au sein d'un ensemble de FB.

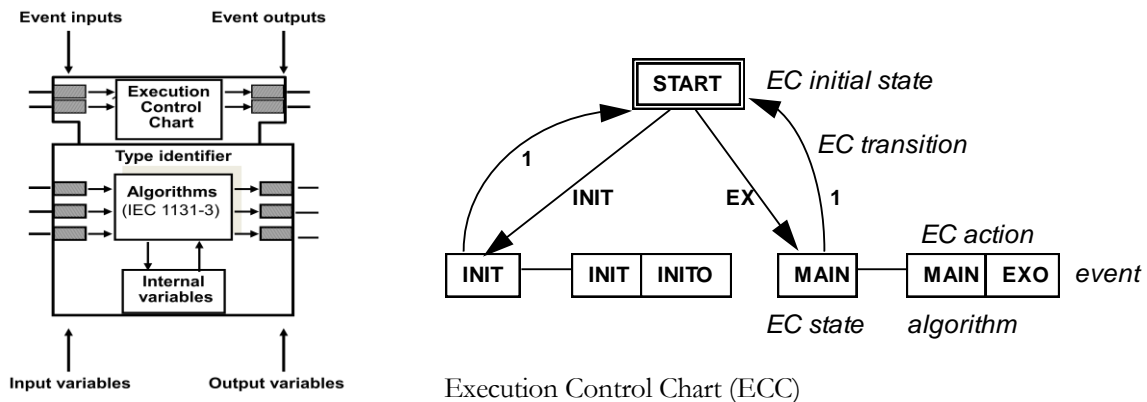


Figure 20. Modèle générique d'un *Function Block* basique (d'après (Christensen 2000)).

La norme définit la notion de FB composé comme une encapsulation d'un réseau de FB. Le support d'exécution est modélisé par un réseau de "*devices*". Un *device* est un sous-système physique du système de contrôle. Les *devices* communiquent entre eux grâce à un ou plusieurs liens de communication. D'autre part, ils contiennent l'interfaçage avec les processus contrôlés. Ces interfaces sont modélisées par des FB spécifiques. Un *device* (*physical device*) peut être divisé en plusieurs ressources (*virtual device*) possédant chacune leur propre interface.

Suite à la collaboration étroite entre l'Université de Calgary et la société Allen-Bradley (Rockwell Automation, où James CHRISTENSEN est *Senior Principal Engineer*), l'architecture MetaMorph utilise ensuite la norme IEC 61499 : (Balasubramanian *et al.* 2001) propose de définir une architecture multi niveaux du DCOS qui soit compatible avec le paradigme holonique.

- **HCD (Holonc Control Device)**

Ceci a entraîné un fort intérêt de la communauté HMS, dont différents travaux utilisent les FB de la norme IEC 61499 en vue de l'implantation de HMS (Wang 2001, Christensen 2003b, Bal *et al.* 2006, Sünder *et al.* 2006...). Actuellement, plusieurs dizaines d'équipes de recherche travaillent autour de cette approche, parfois appelée *Holonc Control Device*. Citons par exemples des laboratoires universitaires en Allemagne (Automation Technology Lab. - Université Martin Luther), en Autriche (Odo Struder Lab. – TU Wien), aux USA (Flexible Automation Lab. – University of Illinois), au Canada (DMME, University of Calgary), en Finlande (TU of Tampere) et en Grèce (Université de Patras), et des laboratoires privés (industriels), au Japon (Yamatake Corporation), en Autriche (Profactor GmbH) et aux USA (Rockwell Automation).

Plusieurs propositions de solutions ont été envisagées par cette communauté, par exemple :

- en utilisant des FB composites (figure 21), ce qui permet de pouvoir associer dynamiquement des contrôleurs distribués pour constituer temporairement les systèmes de commande adaptés à telle ou telle application :

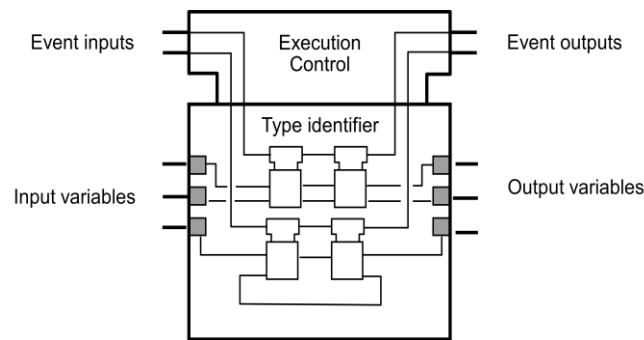


Figure 21. Modèle générique d'un *Function Block* composite (d'après (Wang 2001, Walke 2005)).

- en employant des FB spécifiques aux HMS (figure 22), avec par exemple un FB gérant le protocole d'interaction dans le domaine de coopération, et un FB local supervisant des FB 'device'. Les Holons négocient et coordonnent les tâches de production *via* les domaines de Coopération (par exemple, domaine du fraisage, ou domaine du transport). Les tâches sont réalisées par des applications IEC 61499, générées en fonction des besoins.

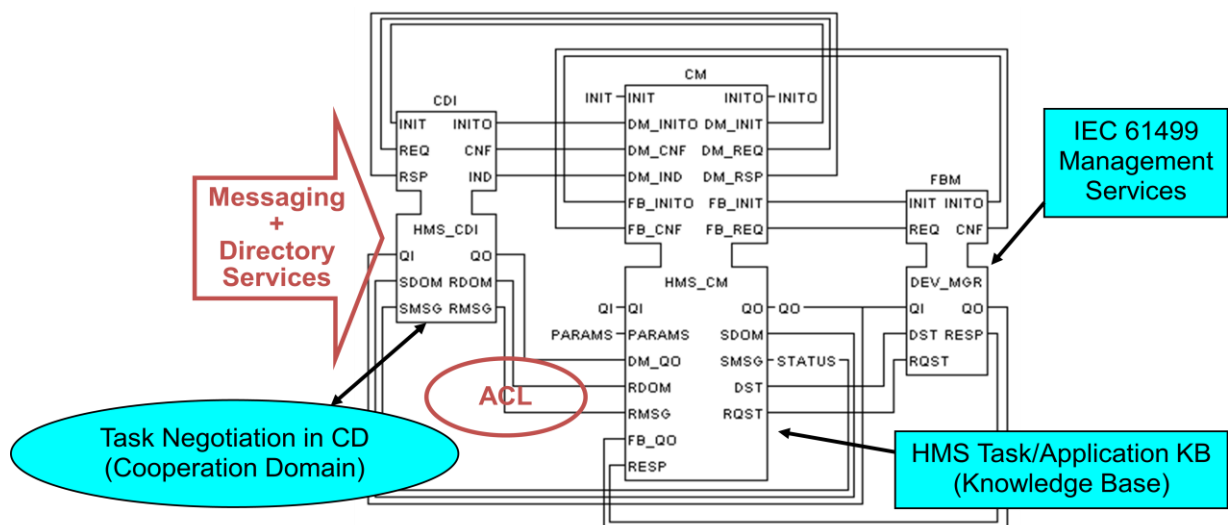


Figure 22. Architecture *Holonc Control* utilisant des *Function Block* (d'après (Christensen 2003b)).

Ces FB sont les mêmes que ceux employés dans les systèmes de commande traditionnels, c'est-à-dire centralisés et/ou hiérarchisés.

- en substituant un agent à l'ECC (figure 23) : dans ce cas, l'agent traite des hauts niveaux de prise de décision et de la communication inter-holon, via un ACL (*Agent Communication Language*) (FIPA 2003). Un ACL spécifie un ensemble de types de message et la description normative d'un ensemble de protocoles d'interaction de haut niveau, y compris la demande d'action, l'établissement de contrat (contract net) et plusieurs genres de ventes aux enchères.

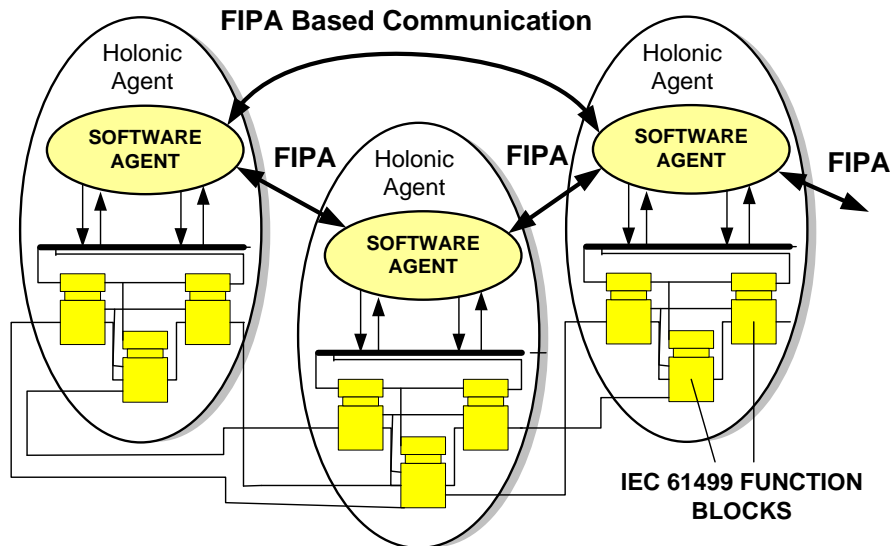


Figure 23. Architecture Multi Agents/*Function Block* (d'après (Marik & McFarlane 2005, Bal *et al.* 2006)).

- **Adacor**

ADACOR (*ADaptive holonic COntrol aRchitecture for distributed manufacturing systems*) est une architecture relevant du paradigme holonique et développée à partir du début des années 2000 à l'Université de Porto. Son objectif est d'améliorer l'exécution des systèmes de commande des systèmes de fabrication, en favorisant l'agilité et la flexibilité, permettant ainsi à l'entreprise de faire face aux changements de son environnement. Son architecture permet d'avoir une approche centralisée quand l'objectif est l'optimisation et une approche hétérarchique en présence d'événements inattendus (Leitão & Restivo 2006). L'architecture d'ADACOR repose sur les bases suivantes : des systèmes décentralisés sont assistés par des entités de supervision (*supervisor entities*), le tout fonctionnant en auto organisation (*self organisation*). Cela apporte les avantages de la modularité, de la décentralisation, de l'agilité, de la flexibilité, et de la robustesse. L'introduction de l'entité de supervision permet l'établissement de hiérarchies dans un système décentralisé, pour réaliser l'optimisation globale du système de production. L'introduction des possibilités d'auto organisation laisse l'évolution et la reconfiguration dynamiques du système, permettant de gérer l'optimisation de la production globale ainsi que des réactions agiles face aux perturbations inattendues.

Cette auto organisation est en fait fondée sur 3 caractères : l'autonomie, l'anticipation et la réorganisation.

L'ensemble des holons autonomes et coopératifs d'ADACOR permet d'améliorer les possibilités d'adaptation face aux changements d'environnement, notamment en favorisant la distribution des qualifications et des informations. Chaque holon peut être une entité physique (machine, équipement, poste de travail, baie de commande... ou opérateur) ou une entité logique (produit, ordre...). Chaque holon est autonome, au sens où il a ses propres objectifs, ses propres connaissances et ses propres compétences : chaque holon a le plein contrôle de son

comportement et possède des possibilités de raisonnement qui lui permettent de prendre des décisions concernant ses propres activités (figure 24).

Ensuite, ces holons ne répondent pas seulement aux changements de l'environnement : ils peuvent se permettre de prendre l'initiative concernant la planification si certaines conditions laissent présager de futures perturbations. Ils peuvent alors anticiper et corriger de futurs dysfonctionnements, pour contrer de manière préventive leur occurrence. Une coopération entre les différents holons est ici indispensable pour obtenir des informations complémentaires car les holons n'ont qu'une vue locale et partielle du système de production global.

Enfin, l'adaptabilité de l'architecture ADACOR autorise une flexibilité élevée de manière dynamique : en effet, ADACOR donne la possibilité de modifier en ligne la structure de production sans avoir besoin de réinitialiser et de reprogrammer le système.

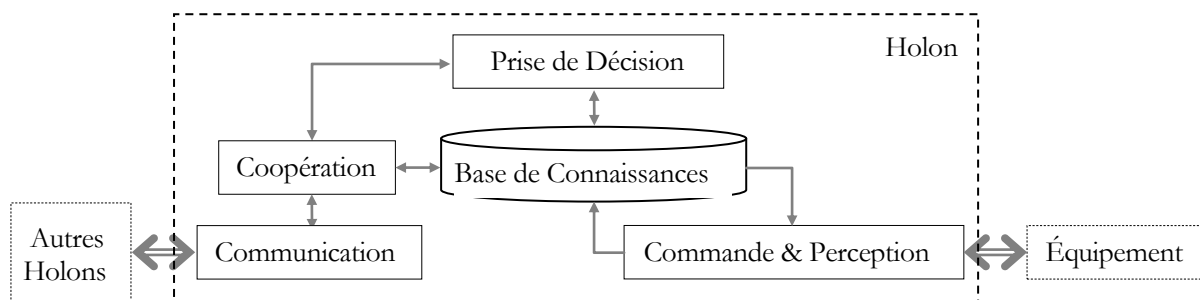


Figure 24. Modèle d'un holon générique dans ADACOR (d'après (Bryan *et al.* 2003))

L'architecture interne d'un holon dans ADACOR (figure 24) montre le rôle de composants complémentaires :

- le composant de communication est responsable de l'interaction entre les holons, mais aussi du partage des connaissances locales,
- le composant de décision règle le comportement de holon, c'est à dire l'exécution des opérations de fabrication, tels que la planification, et l'exécution du processus (qui inclut l'expédition, la surveillance et la réaction aux perturbations). Le holon est apte à tout moment de prendre une décision, selon les informations mis à sa disposition. L'information est acquise par la perception de l'environnement et par l'arrivée de messages en provenance d'autres holons. Lorsqu'une décision est prise, soit il s'agit d'activer de nouvelles consignes de commande, soit il s'agit d'expédier un message vers d'autres holons.

L'architecture d'ADACOR est définie autour de quatre types de holon : *Product* (PH), *Task* (TH), *Operational* (OH) et *Supervisor* (SH). Les holons Produit, Tâche et Opérateur (au sens exécutant) sont relativement similaires aux holons définis dans l'architecture de référence PROSA, respectivement aux holons Produit, Ordre et Ressource.

Le holon Produit représente un produit destiné à être fabriqué. Il contient toutes les informations reliées au produit et est responsable à court terme de la planification du processus : c'est le holon Produit qui a la charge de la réalisation du produit. Si des matières premières viennent à manquer, des sous-holons Produits sont créés pour suppléer ce manque. Si les matières premières sont là, le holon Tâche est activé.

Le holon Tâche représente un ordre de production dont il contient toutes les informations dynamiques. Il décompose la demande, planifie et réalise l'allocation de ressources, demande les palettes de matières premières au système de transitique, distribue les tâches aux holons Opérateur, demande de ranger les palettes de produits finis...

Le holon Opérateur représente les ressources physiques opérationnelles, c'est-à-dire disponibles (opérateurs humains, robots, machines. . .). Il a en charge la transformation physique des matières, et pour cela, gère l'adéquation du comportement, des objectifs, des contraintes et des compétences : le résultat de cette activité de prise de décision se trouve dans l'organisation de son agenda, c'est-à-dire dans la gestion de la liste prévue des ordres de fabrication qui doivent s'exécuter au cours du temps. Il gère également les perturbations dans cette liste. Il s'enregistre lors de sa création auprès du holon Superviseur.

Le holon Superviseur présente par contre des caractéristiques non trouvées dans l'architecture PROSA. L'existence de différents niveaux de hiérarchie exige la présence des entités coordinatrices. C'est ce holon Superviseur qui gère la coordination et l'optimisation globale de la commande décentralisée et qui est responsable de la formation et de la coordination des groupes de holons. Des programmes d'optimisation sont élaborés périodiquement et déclenchés soit par l'horloge interne du holon Superviseur, soit par l'apparition d'une perturbation. La décision pour créer un groupe peut résulter de la nécessité d'optimiser la production ou peut naître de l'existence de contraintes de localisation.

Un holon Opérateur peut être constitué de plusieurs holons Opérateur et/ou Superviseur, agissant pour ce dernier en tant que composant logique. Ce système permet le développement structuré des applications de pilotage de fabrication par l'encapsulation des fonctions ou des composants de fabrication.

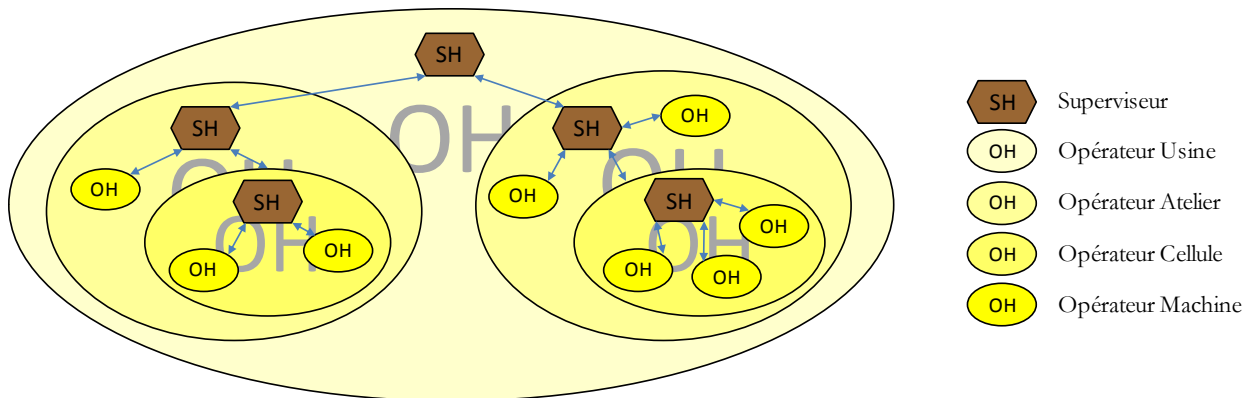


Figure 25. Exemple d'une cellule de production, encapsulée dans un atelier et encapsulant des machines

ADACOR fonctionne avec différents types d'interactions entre les holons. La figure 26 montre le rôle central des holons Superviseur et le rôle particulier des holons Produit.

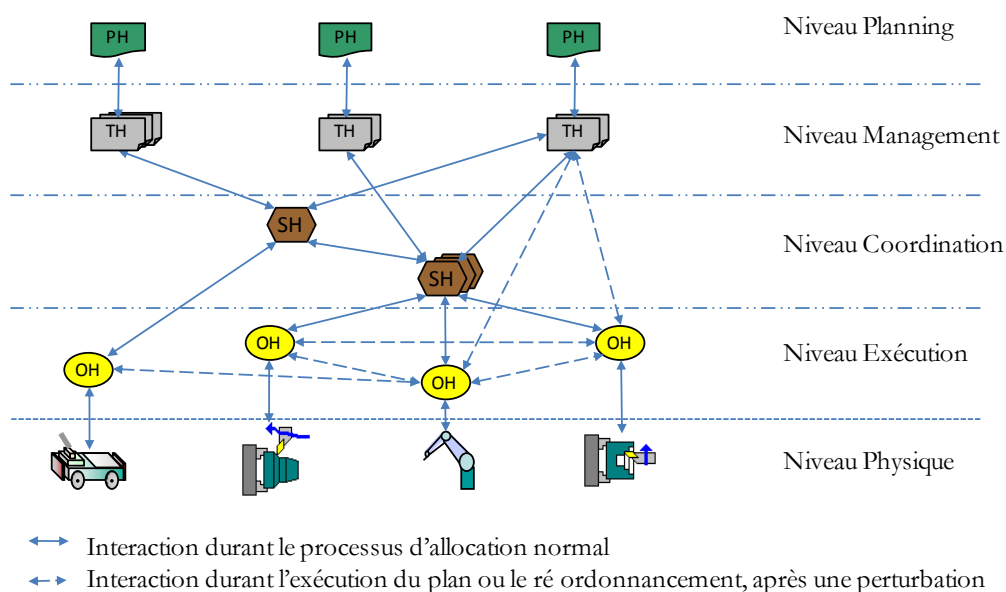


Figure 26. Interactions entre les différents types de holon (d'après Leitão & Restivo 2006)

Au niveau des interactions entre holons Produit et Tâche, il s'agit d'échanges sur les produits et d'informations de planification, et qui relient les niveaux planning et management. Par ailleurs, les holons Produits agissent indirectement sur les holons Opérateur et Superviseur, lors de l'élaboration des procédés, afin de vérifier la disponibilité des holons Opérateur.

Les échanges entre les niveaux management et coordination sont assurés par les holons Tâches et Superviseur, ce qui permet de gérer les propositions d'exécution des opérations de manière optimisée. Ils procèdent également à un échange d'informations sur la distribution des ressources.

Le niveau coordination, c'est-à-dire la présence des holons Superviseur, ne fonctionne seulement que pour des scénarios stables, avec un système de production fonctionnant comme prévu, sans apparition de perturbations. Le Superviseur indique alors la manière optimale de fonctionner aux holons Tâche et Opérateur.

Par ailleurs, il existe des interactions directes entre les holons Tâche et Opérateur, donc entre le niveau management et le niveau exécution, pour la mise en œuvre et la surveillance du plan de production initialement planifié par le holon Produit.

Lors du fonctionnement normal ou lors d'aléas peu perturbants, les holons Opérateurs interagissent entre eux et synchronisent de leurs activités. Lors d'une perturbation plus conséquente, les interactions directes entre les holons Tâche et Opérateur permettent de réaliser un plan réduisant à son minimum l'impact de la perturbation.

Enfin, il existe également des interactions entre holons Superviseur et Opérateur, lors de la réorganisation de la structure de commande. L'adaptation de l'architecture globale est basée sur une adaptation dynamique de chaque holon. L'interaction entre ces holons permet de propager rapidement l'information.

Le facteur d'autonomie, associé à chaque holon opérationnel, est un paramètre qui reflète le degré d'autonomie de chaque holon. La coordination réalisée par les holons Superviseur gère l'optimisation globale du système. L'apparition de perturbations déclenche un comportement adaptatif qui détermine l'évolution du facteur d'autonomie associé à chaque holon Opérateur, selon un ensemble de règles. Ceci est détaillé dans (Leitão *et al.* 2003, Leitão & Restivo 2008) : le développement d'une dynamique adaptative améliore l'agilité et la réaction à des perturbations inattendues en profitant de la souplesse offerte par le HMS sans compromettre l'optimisation globale. Le mécanisme d'auto-organisation proposé dans ADACOR introduit la notion de facteur d'autonomie ainsi qu'un mécanisme de diffusion d'une phéromone pour propager l'émergence et de réorganiser le HMS.

• Fabricare

Fabricare est une autre interprétation du paradigme holonique également issue de l'Université de Porto. '*Fabricare*' signifie fabriquer en latin, c'est-à-dire faire ou faire faire certaines tâches documentées selon des 'règles de l'art'.

Fabricare est placé sous le signe de la dynamique des tâches, et donc de l'ordonnancement de ces dernières, qui doit avoir une haute flexibilité, une haute adaptabilité et une haute disponibilité.

Fabricare est initialement (Sousa & Ramos 1999) fondé sur 2 types de holons de base, les holons *Resource* (Ressource) et les holons *Task* (Tâche, en fait, les ordres de fabrication).

Pour permettre au système de production de fonctionner, certains de ces holons coopèrent ensemble dans une holarchie, qui est en fait elle-même un holon *Scheduling* (Ordonnancement), comme le montre la figure 27. Cela forme ainsi un holon de plus haut niveau. Il s'agit de gérer l'évolution des flux dans le temps.

C'est le même principe d'agrégation d'une holarchie entre les holons Produit et Ressource qui constitue le holon Planification du Process. Il s'agit là de gérer en fait les flux dans l'espace.

En 2004, la version finalisée de *Fabricare* (Sousa *et al.* 2004) laisse apparaître la dimension conception du produit manufacturé, avec un holon *Design* (Conception) constitué du holon *Product*, *Supplier* (Fournisseur) et *Customer* (Client). Par ailleurs, le holon Planification de la Production intègre des holons *Sale* (Ventes), ce qui permet d'effectuer des calculs de besoin, des analyses de charge/capacité, selon les principes classiques du MRP (*Material Requirements Planning*).

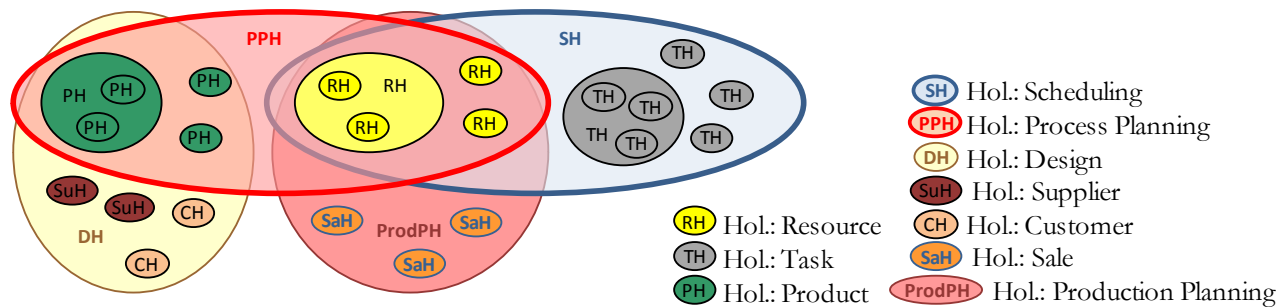


Figure 27. Architecture holonique de l'approche *Fabricare* (d'après (Sousa *et al.* 2004)).

Nous pouvons constater que les holons Ressource font partie de trois holons : le holon de Planification de la Production, le holon d'Ordonnancement et le holon de Planification du Process. D'autre part, les holons Produit font partie de deux holons : le holon de Planification du Process et le holon de Conception.

Ces holons étant donc en interactions multiples (dans diverses holarchies), le protocole d'interaction à utiliser doit être plus élaboré que les protocoles FIPA qui sont habituellement employés. En cela, les 'intérêts' des holons de plus haut niveau sont exprimés sous forme de contraintes, que le protocole choisi (Davis & Smith 1983) se force de respecter. Ce sont ces mécanismes qui permettent d'obtenir un ordonnancement dynamique (Sousa & Ramos 1998) et réactif, même lorsqu'on ne dispose pas de toutes les informations nécessaires (Sousa *et al.* 2000).

Par ailleurs, l'architecture holonique étant perpétuellement en évolution, chaque holon a un cycle de vie et un graphe d'état (Sousa *et al.* 2004). Les conditions de passage d'un état à l'autre sont complètement définies, ce qui permet de confirmer le caractère formel de l'approche. Les interactions sont plus particulièrement détaillées dans (Sousa *et al.* 2003).

Enfin, il est à noter que si *Fabricare* s'appuie sans réserve sur le paradigme holonique, la mise en œuvre est réalisée *via* des technologies multi-agents, et que les expérimentations présentées ont un caractère académique.

• Autres travaux en Europe

De nombreux autres travaux sont conduits en Europe sur les HMS, notamment en Grande Bretagne, en Allemagne, en Italie... et en France.

En Grande Bretagne, la contribution la plus importante est apportée à l'Université de Cambridge, dans l'*Institute for Manufacturing*, et plus particulièrement au *Distributed Information & Automation Laboratory*, sous l'animation de Duncan MCFARLANE. Tout d'abord, il est à noter que les tout premiers travaux de Duncan MCFARLANE ont porté sur un modèle de simulation pour un HMS associé à un processus continu de production (McFarlane 1995) : ceci reste assez rare, les applications des HMS étant généralement effectuées sur des Systèmes de Production de type à événements discrets. Ensuite, l'approche holonique orientée composant HCBA (*Holonic Component-Based Approach*) définit les holons ressource et les holons produit (McFarlane & Bussmann 2003) et propose un WIP (*Work-In-Progress*), qui est un agent du holon ordre (Chirn & McFarlane 2000). Dans HCBA, les holons sont définis comme des blocs de construction intelligents, avec des capacités *plug and play*.

Cette équipe de recherche est actuellement reconnue pour ses travaux sur l'impact des technologies infotroniques sur les systèmes de production (McFarlane & Shaw 2006, McFarlane *et al.* 2007), avec des focus plus importants sur le produit intelligent (McFarlane *et al.* 2002) et sur le pilotage intelligent des systèmes de production (McFarlane *et al.* 2003, Wong & McFarlane 2007). C'est sur ce dernier aspect qu'ont été abordés les HMS, avec des thèmes comme l'architecture décisionnelle (Bongaerts *et al.* 2000), les impacts sur l'organisation de la *Supply Chain* (Wong *et al.* 2002, McFarlane *et al.* 2005), l'étude des protocoles de communication (Brusey & McFarlane 2005), la mise en œuvre *via*

des technologies multi-agents (Marik & McFarlane 2005).

Une contribution fondamentale apportée par Duncan MCFARLANE a été d'associer dans la boucle proprioceptive le produit en tant qu'élément actif et intelligent pour la perception d'un système de production (figure 28).

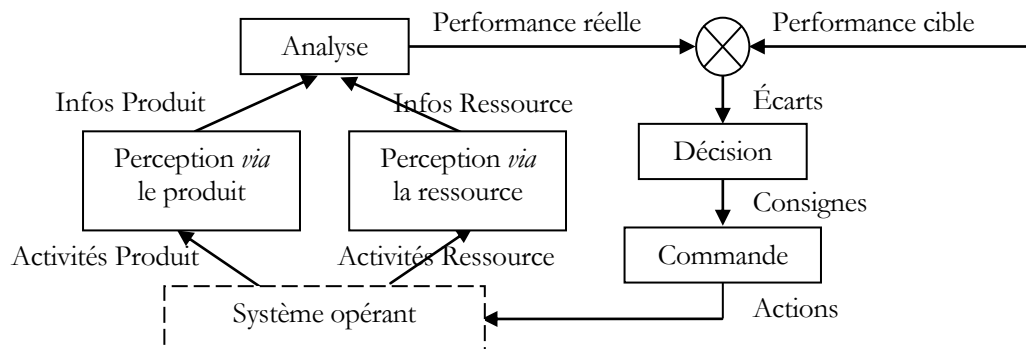


Figure 28. Boucle proprioceptive intégrant le produit intelligent (d'après (McFarlane *et al.* 2002)).

Ceci marque une vraie rupture avec un modèle comme PROSA, où le produit était vu comme statique, uniquement délivrant les informations nécessaires. Ici, le produit a un rôle actif, chaque produit, composant, pièce... contribue à l'élaboration des consignes. Bien entendu, dans le cadre d'un système holonique, cela se fait de manière distribuée, en coopération avec d'autres types de holons. Par exemple, sur ce thème des HMS, des collaborations ont été menées avec des chercheurs australiens, proposant un modèle holonique de ressources permettant de séparer les aspects processus des aspects exécution (Jarvis *et al.* 2003), suivi par la mise en œuvre dans une cellule d'assemblage robotisée d'un modèle de référence (Jarvis *et al.* 2006) où les holons sont caractérisés par les services qu'ils délivrent et par les services qu'ils requièrent auprès des autres holons.

L'Allemagne fut dès le début de l'initiative IMS un partenaire important, associant des Universités (Université de Bremen, Université de Kaiserslautern...) et des industriels (Daimler-Benz...) avec de nombreuses contributions. Partant d'une culture scientifique orientée Systèmes Multi Agent (Müller & Pischel 1993, Bussmann & Muller 1993, Bussmann 1998, Fischer 1999), les travaux se sont progressivement appuyés sur le paradigme holonique (Bussmann & McFarlane 1999, Gerber *et al.* 1999), et ont débouché sur le concept de Système Multi Agent Holonique, qui enrichit le paradigme Multi Agent par des concepts spécifiques au paradigme holonique (Fischer 1999, Schillo & Fischer 2003)... Par exemple, dans (Bürckert *et al.* 2000), des camions font directement l'objet d'un protocole d'interaction associant les tâches de transport, les camions, les transporteurs, les chauffeurs – routiers et des mécanismes de recherche de chemin dans un graphe routier. Dans (Jennings & Bussmann 2003) – une autre collaboration germano-anglaise de Stephan BUSSMANN – un système de modules standard, où chaque module est encadré par un agent intelligent afin de composer un holon (lequel devient la pierre angulaire du système) a été testé par Daimler-Chrysler en vue d'évaluer ses performances réelles. Le résultat obtenu est à 99,7% de la valeur théorique optimale, et de ce fait, ce système a été adopté à l'usine de Stuttgart-Untertürkheim en Allemagne.

Plus récemment, le *survey* présenté par (Scholz-Reiter & Freitag 2007) montre une parfaite connaissance des travaux de recherche en *Manufacturing* et pose les limites des HMS vis-à-vis de l'introduction des technologies infotroniques et de l'informatique ambiante. Parallèlement, d'autres travaux continuent d'enrichir les modèles existants. Par exemple, (Zimmermann & Mönch 2007) propose d'introduire des propriétés d'auto adaptation au holon Staff dans l'architecture de référence PROSA (Van Brussel *et al.* 1998). De telles propriétés lui permettent de s'assurer que les paramètres des algorithmes de pilotage de la production sont bien ajustés en fonction d'une situation donnée. En utilisant la technologie multi-agents, les auteurs décrivent le modèle de cet agent Staff adaptatif, et montre un cas d'utilisation dans la micro électronique.

Nous pourrions continuer ainsi le tour de l'Europe, tant l'intérêt pour les systèmes holoniques y est important.

Citons (Giebels *et al.* 2001), de l'Université de Twente (Pays Bas), qui présente une structure de contrôle holonique permettant de combler l'écart entre le processus de planification et de la planification de la production. Il s'agit d'envisager ces 2 fonctions, normalement séquentielles, avec une approche stratégique simultanée. Pour cela, cette méthode de planification utilise des modèles d'incertitude de l'information, représentant l'incomplétude de la planification et des données et la contingence des événements.

En Bulgarie, à l'Université Polytechnique de Bucarest, (Borangiu *et al.* 2009) propose une architecture holonique basée sur la Connaissance pour l'assemblage en Job Shop dans une cellule robotisée. Il s'agit d'enrichir un modèle proposé antérieurement (Babiceanu *et al.* 2004, Borangiu *et al.* 2007) par des holons 'Expert'. Ces holons 'Expert' peuvent mettre en œuvre un algorithme d'optimisation, tel qu'une heuristique ou un solveur de programmation linéaire, ou alors utiliser des techniques de simulation dynamique à événements discrets. Bref, cela joue un peu le rôle que peut avoir un holon Staff.

A l'Université de Valence (Espagne), (Giret & Botti 2004) a étudié de manière comparative les paradigmes multi-agent et holonique. Pour réduire l'écart entre les deux, un *Abstract Agent*, qui peut être lui-même un agent ou un système multi-agent, est proposé pour enrichir le paradigme multi-agent. Cela revient à doter ce dernier des propriétés de récursivité propre aux HMS. (Giret & Botti 2009) propose ensuite une méthodologie d'ingénierie multi-agent, ANEMONA, basée sur l'architecture PROSA, et qui permet d'aborder de manière unifiée et simultanée les deux formalismes, pour l'analyse, la conception et l'implémentation. A ce stage, ANEMONA fournit des *templates* de spécification d'agents (par exemple, JADE) et de *Function Blocks* (IEC 61499).

En ce qui concerne l'Italie, nous pouvons citer (Dominici 2008), un économiste de l'Université de Palerme, qui présente un *survey* sur les HMS afin d'envisager ultérieurement des recherches sur les aspects économiques de ce type d'approches. Par ailleurs, nous pouvons citer des collaborations franco-italiennes, comme (Terzi *et al.* 2007), entre l'Université de Nancy et l'École Polytechnique de Milan, qui utilise le modèle du holon Produit pour assurer la traçabilité des opérations lors du désassemblage en fin de vie, ou encore (Cossentino *et al.* 2007, Cossentino *et al.* 2008), entre l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard et l'Université de Palerme, qui mutualisent leurs compétences réciproques pour le développement de Systèmes Multi-Agent Holoniques. Ceci nous a rapprochés de la France...

- **Activités de recherche sur les HMS en France**

En France, les principaux travaux sur les HMS sont conduits principalement à Nancy, mais aussi à Nantes et... à Marseille.

A l'Université Henry Poincaré de Nancy, l'intérêt marqué par le CRAN, autour de Gérard MOREL, pour les HMS date des années 2000, mais s'appuie sur des questionnements antérieurs (Morel & Jung 1997, Chaxel *et al.* 1999). Partant d'une forte expérience sur les techniques plus ou moins formelles de modélisation et d'ingénierie système visant à contrôler automatiquement le comportement dynamique de la complexité des systèmes de fabrication, (Morel *et al.* 2003) propose d'élargir l'approche traditionnelle de l'ingénierie automatisée à l'ingénierie système. Le champ de mise en œuvre proposé est celui d'un Holonic Manufacturing Execution System, avec un florilège *ad hoc* de modèles formels et informels.

Par ailleurs, les recherches s'orientent très rapidement vers le concept de 'contrôle par le produit', tout en continuant d'utiliser les apports de l'ingénierie système (Pétin 2007). (Gouyon 2004) propose une méthode formelle d'automatisation des systèmes contrôlés par le produit. A partir d'un certain nombre de concepts, méthodes et outils (Systèmes Holoniques, UML, Automates à états finis), et de la théorie de la Supervision, un modèle d'état de chaque instance du produit assure le suivi du produit réel tout au long du parcours de sa gamme. Le produit entre alors dans la boucle de contrôle, car il est doté de fonctions décisionnelles comme le décrit la figure 29.

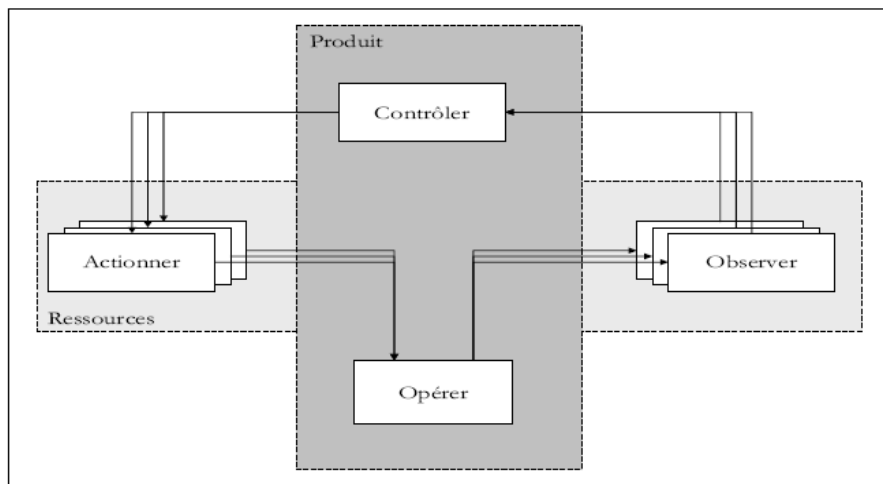


Figure 29. Processus de contrôle d’une ressource par le produit (d’après (Gouyon 2004)).

Les techniques de synthèse formelle de la commande basée sur le contrôle par supervision permettent d’obtenir une structure de contrôle définie par les objectifs fixés précédemment : les commandes des différentes ressources de production sont élaborées hors ligne, selon des règles de fonctionnement et de collaboration, puis elles sont personnalisées en ligne par chaque produit, qui embarque pour cela ses propres règles de contrôle. Le processus de contrôle de la fabrication par le holon produit contrôle le routage sur les différentes ressources, coordonne l’activation des tâches par les ressources, vérifie le bon déroulement du procédé et en assure le suivi. Parallèlement, le processus de contrôle des holons ressources par le produit reçoit et traite les requêtes émises par le holon produit, transforme les consignes en action de transformation du produit, assure la conduite de l’opération et génère des informations en vue de la validation qualitative du produit.

L’ensemble de cette approche conceptuelle a été projeté sur les équipements de l’Atelier Inter-établissement de Productique de Lorraine (ERP, MES, équipements sous ISA95) (Gouyon *et al.* 2007). Actuellement, l’implantation de cette techniques est en train d’être effectué sur des motes – nœuds miniaturisés dans un réseau de capteur sans fil (Gouyon & David 2009).

Ces travaux sont très proches de ceux de (Terzi *et al.* 2004), qui utilise le holon produit comme vecteur pour assurer la traçabilité et en propose un modèle UML (figure 30) et également de ceux de (Simao 2005) qui propose un méta-modèle, type UML, des HMS.

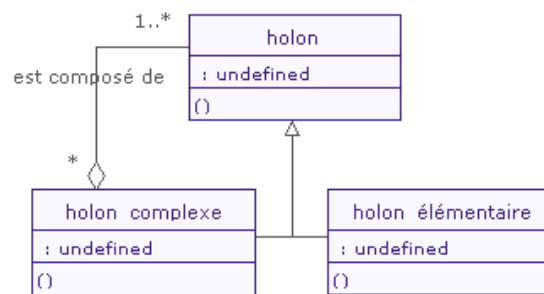


Figure 30. Modèle UML de composition d’un holon.

En fait, ce méta-modèle propose une architecture de holons assurant le contrôle commande du système de production à partir des informations portées par les holons produits et les holons machines et au travers de règles d’expertise. Un *Holonic Manufacturing Execution System* type ‘pilote par le produit’ a été expérimenté *via* un système

de simulation réalisé en technologie multi-agent, avec un mode de communication entre agents basé sur des règles par notification. Ceci montre les propriétés d'une telle approche (Simao *et al.* 2006). Après avoir déclaré, lors de leur initialisation, les attributs qu'ils possèdent à leurs pairs, les agents voulant être informés de la valeur de certains attributs d'autres holons, « s'abonnent », et sont ensuite notifiés lors des changements de valeurs. A chaque notification (c'est-à-dire à chaque réception d'un message indiquant la nouvelle valeur d'un attribut), les règles embarquées dans l'agent sont évaluées, et peuvent produire une action telle que le déclenchement d'une opération par un pair, l'interrogation sur la valeur d'un attribut, le changement de la valeur d'un attribut d'un pair.

Les travaux de Sahla BAÏNA (Baïna 2006) présentent une approche pour l'« interopérabilité orientée produit » entre des systèmes d'entreprise de haut niveau d'une part, et des systèmes de contrôle d'atelier, d'autre part. Cette interopérabilité est basée sur les échanges d'informations relatives au produit, en se basant sur différents modèles et représentations de ce produit dans chacun des systèmes, et ceci autant dans le cas de la production de biens manufacturés que dans celui de la production de services. Toujours en s'appuyant sur le concept de holon produit comme l'agrégation de parties physique et informationnelle, il est montré comment les outils de modélisation orientés objets facilitent la modélisation des processus d'entreprise et des processus de production. Par exemple, le diagramme de classe d'un holon (figure 30) va être traduit sous la forme d'un ensemble de contraintes formalisées en OCL (Object Constraint Language - langage formel de prédicats du 1er ordre standardisé dans les modèles UML). Ainsi, la propriété de composition propre au paradigme holonique se traduit par 'Un holon qui ne possède pas de partie physique, est obligatoirement un holon complexe composé d'autres holons'. Par ailleurs, 'Un holon élémentaire possède nécessairement une partie physique et une partie Informationnelle' et 'Un attribut qui décrit une partie physique d'un holon fait nécessairement partie de la partie informationnelle de ce même holon'. La dernière version de ces modèles UML est disponible dans (Baïna *et al.* 2009).

Des travaux complémentaires sont également conduits sur des thématiques connexes. Citons :

- la mise en place d'un environnement d'évaluation de performance pour systèmes de pilotage par le produit (Pannequin 2008, Pannequin *et al.* 2009) : ceci permet d'apporter expérimentalement des éléments lors de la conception et la mise au point de nouvelles architectures de contrôle par le produit, puis de faciliter leur industrialisation,
- la mise en œuvre du pilotage par le produit dans le cas d'usines travaillant en flux tirés (El Haouzi *et al.* 2007), nécessitant une synchronisation au niveau des approvisionnements (El Haouzi *et al.* 2009) : pour cela, (El Haouzi 2008) propose une méthodologie pour le déploiement d'un tel système à l'échelle d'un groupe industriel ayant plusieurs unités de production, tout en assurant la généricité des outils et solutions présentés et des indicateurs de performances. Ces derniers contribuent par ailleurs à l'évaluation de la pertinence à l'échelle industrielle du concept de Système Contrôlé par le Produit.

L'IRCCyN (Université de Nantes) est un autre laboratoire ayant les HMS comme thème de recherche : sous la direction de Pierre CASTAGNA, et en ayant PROSA comme référence.

Pascal BLANC a mis en œuvre un HMES dans le contexte industriel d'une entreprise sud américaine fabricant des vitres blindées pour automobiles (Blanc 2006). Il propose les modèles UML des différents holons qu'il utilise, ce qui permet de voir la dynamique de leur fonctionnement, tant du point de vue de la synchronisation des holons ordre (éclatement de la nomenclature, calcul des besoins et mise en œuvre des délais d'obtention, propagation des éventuelles perturbations et des ajustements nécessaires), ce qui débouche sur l'ordonnancement réalisé par les holons ressources. Pour cela, les interactions Holon Ordre – Holon Produit et Holon Ordre – Holon Ressource sont particulièrement étudiées et donnent lieu à un diagramme d'état du Holon Ordre très intéressant (figure 31).

Par ailleurs, ce HMES reste interfacé avec l'ERP de l'entreprise, et fournit ainsi une partie des informations nécessaires au mécanisme de décision des Holons Ordre. Une plateforme d'expérimentation a été réalisée à partir d'une partie émulant le système de production réel, à l'aide d'un modèle de simulation réalisé sous ARENA, et d'une partie implémentant le HMES à l'aide de l'outil multi agent JADE.

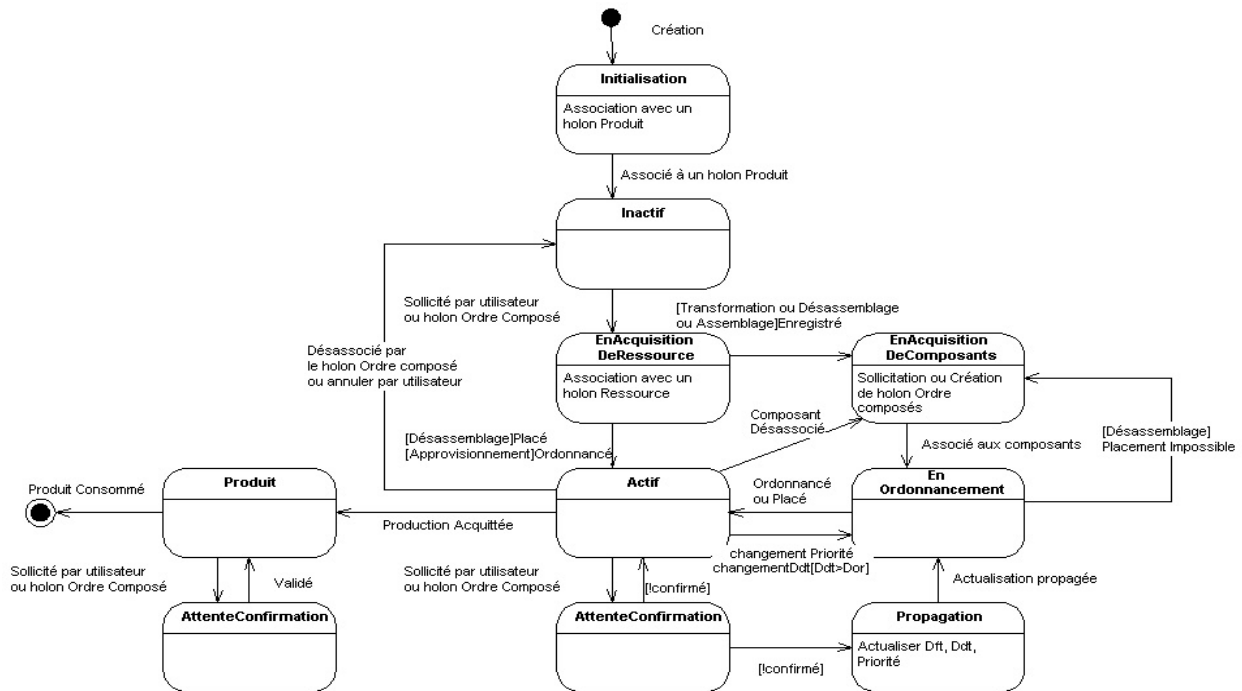


Figure 31. Diagramme d'état d'un Holon Ordre (d'après (Blanc *et al.* 2008)).

Les travaux de Doctorat d'Olivier CARDIN montrent l'intérêt de la simulation en ligne pour le pilotage des systèmes de production (Cardin 2007). Pour opérationnaliser ce concept de simulation en ligne, il faut partir d'un état initial de la simulation qui soit le plus proche possible de l'état réel du système de production. Pour cela, un observateur est introduit dans l'architecture de commande : à chaque mise en œuvre de la simulation en ligne, elle s'initialise sur l'état de l'observateur. Ces travaux initiaux ont été ensuite adaptés pour être appliqués dans un HMS fonctionnant selon le modèle de référence PROSA (Cardin & Castagna 2009). L'observateur et le moteur de simulation constituent alors un Holon Staff, qui sera consulté par les autres holons. Lorsqu'une simulation est ainsi requise auprès du Holon Staff, le simulateur de ce dernier requiert auprès de l'observateur l'état supposé correct du système de production. Ensuite, la simulation en ligne est lancée, et en fonction du résultat de cette dernière, une décision est proposée par le Holon Staff au holon demandeur.

Nous ne nous attarderons pas ici sur les travaux conduits à Marseille, au Laboratoire des Sciences de l'Information et des Systèmes (Université Paul Cézanne d'Aix-Marseille) sur les HMS : ils feront l'objet d'une description étendue dans la suite de ce mémoire.

Il en est de même pour les travaux des équipes travaillant sur les Systèmes Multi Agent Holoniques (SMAH).

• Activités de recherche sur les HMS en Asie

En Asie, les principaux travaux sur les HMS sont conduits au Japon, en Chine, et à Taiwan.

Au Japon, pays en pointe dans l'initiative IMS et qui a fortement contribué à poser les concepts fondamentaux sur les HMS (Suda 89, Suda 90), de nombreuses équipes de recherche travaillent sur ce thème.

(Moriwaki *et al.* 1992) a présenté très rapidement une architecture d'ordonnement avec des agents autonomes pour les pièces, ainsi que pour les équipements (y compris ceux de transport), et a ainsi conçu un modèle de données orienté objet du système de fabrication. (Hasegawa *et al.* 1994) a présenté ensuite une architecture

holonique pour la planification et l'ordonnancement, dans laquelle sont des holons produit, pièce, machine, type de machine, fonctionnement, et coordinateur. (Gou *et al.* 1998) a étudié le mécanisme de coopération entre holons utilisant l'optimisation mathématique par relaxation lagrangienne. Ce travail montre que cette méthode peut générer des ordonnancements de haute qualité dans un laps de temps rapide et peut être étendue à d'autres types de coordination inter systèmes de production. (Kusumi *et al.* 1998) propose une solution décentralisée pour un système holonique de pilotage, qui utilise un réseau neuronal proposé par (Hopfield & Tank 1985) et une fonction critère en logique floue. (Fujita 2001) définit un template de holon où chaque holon a une capacité de décomposition des instructions qu'il reçoit et d'attribuer des instructions, via un mécanisme de négociation, à d'autres holons. Ce template, dupliqué de manière adéquate, permet de tester expérimentalement une cellule d'assemblage comportant une cinquantaine d'holons.

(Arai *et al.* 2001) propose un système d'assemblage basé sur le paradigme holonique, composé de plusieurs robots, d'un convoyeur et de stocks. Le contrôle – commande fonctionne sur la base d'un protocole de type 'contract net' pour organiser les circulations de composants et de produits finis dans la cellule. Par ailleurs, un dispositif (équipement ou machine) peut être installé facilement, et pouvoir immédiatement démarrer pour travailler, ou au contraire retirer. Les auteurs parlent alors de *Plug & Produce*, et se rapprochent de certaines idées d'inspiration japonaises, comme le SMED (*Single Minute Exchange Due*) : ce système doit permettre la reconfiguration rapide des équipements, pour faire face aux changements soudains des produits, avec une robustesse élevée et se rapproche de l'architecture HCBA, déjà évoquée. (Tamura *et al.* 2003) propose le paradigme holonique pour progresser dans les recherches sur les systèmes de production à haute variété et faible volume.

(Sugiyama 2001) montre que l'approche holonique est bien adaptée aux systèmes complexes de grande taille, ce qui n'est pas forcément le cas dans les autres méthodes. Cette équipe de l'Université de Kobe explore diverses pistes. (Iwamura *et al.* 2006a) étudie l'ordonnancement temps réel dans des HMS composés de holons *Resource*, *Job* et *Coordination*. L'utilisation d'un réseau de neurones pour évaluer par simulation les performances futures d'un système de production en fonction des règles de décision qui lui sont révoquées est proposée. Il s'agit donc d'utiliser dans chaque holon les réseaux neuronaux comme outil d'aide à la décision. (Tanimizu *et al.* 2007) propose d'utiliser la simulation dans le HMS pour associer de hautes priorités aux tâches ad hoc et pour changer le statut des ressources. Enfin, (Tanimizu *et al.* 2006) propose l'emploi d'algorithmes génétiques pour obtenir un ordonnancement réactif multi objectifs et (Iwamura *et al.* 2006b) suggère d'utiliser *MultiCriteria Decision-Making* (MCDM) qui, comme son nom l'indique, est un outil d'aide à la décision permettant de progresser dans la résolution d'un problème de décision où plusieurs points de vue, souvent contradictoires, doivent être pris en compte.

A Taiwan, Fu-Shiung HSIEH, de l'Université de Technologie de Chaoyang, travaille sur les moyens d'atteindre l'optimisation globale en HMS (Hsieh 2008) et sur la façon de spécifier formellement le comportement dynamique des HMS, c'est-à-dire comment devrait évoluer la structure de contrôle de la production pour s'adapter aux changements (Hsieh 2009). Des problématiques similaires ont été abordées dans ADACOR (Leitão *et al.* 2003, Leitão & Restivo 2006). Il s'agit de proposer une méthodologie systématique pour développer des mécanismes de reconfiguration permettant de faire face aux changements dans les HMS, y compris la dynamique de la suppression ou de l'ajout de holons. L'approche de (Hsieh 2009) est néanmoins différente de celle adoptée par (Leitão *et al.* 2003), dans la mesure où elle vérifie si les échecs des ressources sont tolérables. Si ce n'est pas le cas, la reconfiguration est nécessaire. Dans ce cas, seuls les holons concernés seront affectés par la reconfiguration, ce qui minimise l'impact sur les tâches et évite le chaos dans l'atelier. Ceci est formalisé sous forme de Réseaux de Petri.

Toujours à Taiwan, l'*Institute of Manufacturing Engineering* de l'Université Nationale de Cheng Kung travaille sur les HMES (Cheng *et al.* 2004a). Un MES y est conçu comme une holarchie à partir d'un modèle objet abstrait basé sur des connaissances de domaine, en partitionnant les domaines d'application en holons fonctionnels, en identifiant les produits génériques parmi les holons fonctionnels, et en définissant les messages de la holarchie. Les holons fonctionnels héritent du Holon *Generic*, lequel possède toutes les propriétés de base d'un holon. (Cheng & Lin 2004)

propose un système d'échange d'informations holonique permettant de transmettre de manière efficace des informations de différents formats parmi les holons au sein d'une entreprise. Différents holons fonctionnels sont envisagés, tels que le Holon *Data Warehouse*, le Holon *Enterprise Resource Planning* (figure 32)... Ce système de communication est géré par un Holon *Exchange*, héritant lui aussi du Holon *Generic*. En vue de renforcer la stabilité de ce système d'échange d'informations, des capacités de détection de panne et des fonctions de récupération assurent la robustesse de chaque flux de messages entre les différents holons et le Holon *Exchange* lui-même. Enfin, tout ceci est étendu au niveau d'un *Supply Chain* holonique, avec l'aide d'un Holon *Communication* utilisant le système RosettaNet, dédié aux processus d'échanges électroniques inter-entreprises (Cheng *et al.* 2004b).

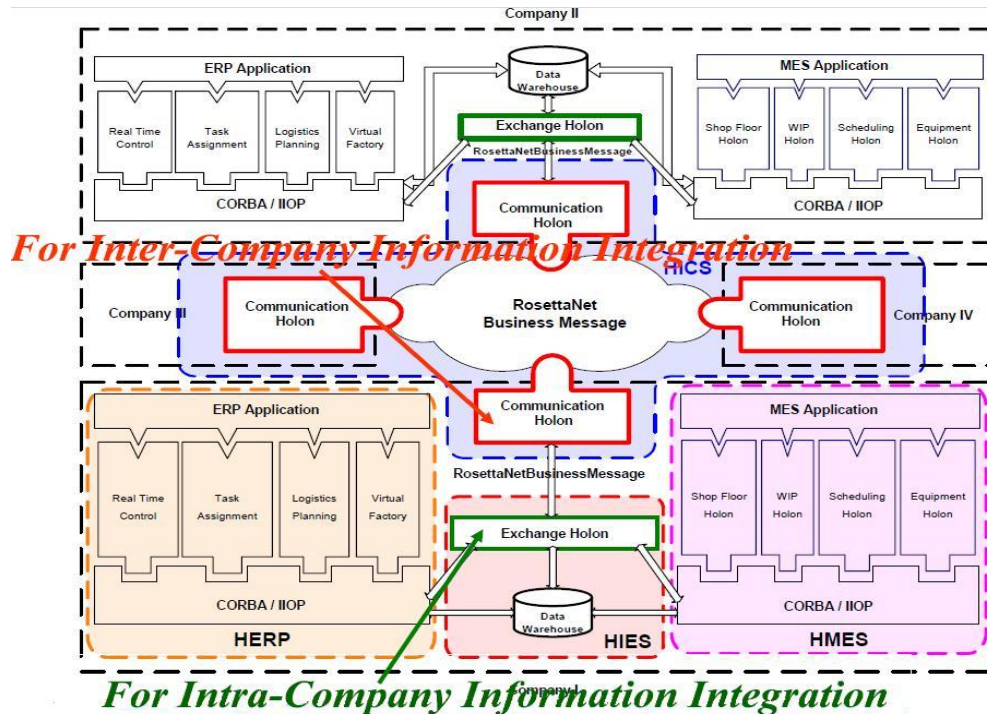


Figure 32. Supply Chain holonique (d'après (Cheng *et al.* 2004b)).

Les premières recherches réalisées en Chine sur les HMS semblent avoir été conduites au Département de *Manufacturing Engineering* de l'Université de Hong Kong. (Ng *et al.* 1996) propose un *Holonic Shopfloor Control System* (HSCS) intégrant toutes les dimensions du paradigme holonique : les holons, qui sont autonomes, coopératifs et standardisés, se regroupent dans des structures dynamiques appelées holarchies et dédiées au traitement décentralisé et coopératif des fonctions du pilotage de la production (planification, ordonnancement, exécution...). Le HMES est constitué en fait de différents modules logiciels réalisés en technologie objet, assurant la modélisation, la spécification des produits et des ressources, la simulation et le contrôle des activités.

Cette première réalisation est approfondie, puis est proposée comme architecture de référence dans (Cheung *et al.* 2000). Pour valider cela, une plateforme de simulation distribuée expérimentale composée d'ordinateurs interconnectés permet de tester l'ordonnancement temps réel de tâches de transformation et de transitique. La validité du modèle ainsi que ses propriétés de reconfigurabilité ont ainsi pu être montrées.

A l'Université de Shanghai, une démarche un petit peu similaire a été conduite par (Zhang *et al.* 2003). Le modèle en résultant, appelé CIPPS pour *Concurrent Integrated Process Planning System*, est orienté sur la mise en place de mécanismes d'actualisation interactive pour l'obtention de la planification. Dans une démarche conventionnelle, la planification des activités opérationnelles se fait strate décisionnelle par strate décisionnelle, selon un processus calculatoire séquentiel enchainant une suite de fonctions allant du niveau global et en raffinant de plus en plus les

détails. Dans CIPPS, ces différentes fonctions deviennent des holons spécialisés qui interagissent directement. Il est évident qu'une telle architecture, décrite dans la figure 33, permet une plus grande réactivité. Le contenu des holons étant relativement classique, les auteurs se sont attelés à bien décrire les interactions entre ces holons, sous la forme de diagramme de séquence.

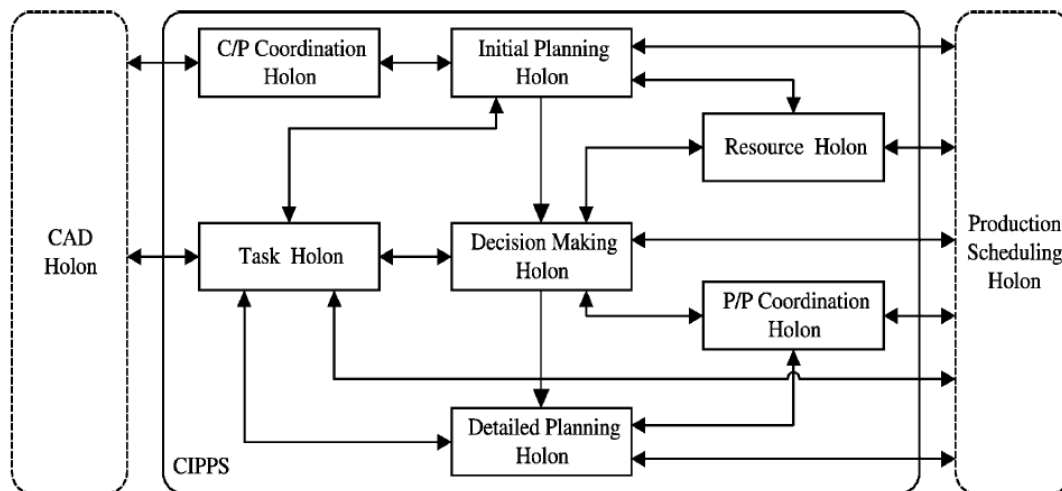


Figure 33. Architecture holonique de CIPPS (d'après (Zhang *et al.* 2003)).

A l'Institut d'Automatique de Pekin, les travaux de (Wang *et al.* 2005a) traitent essentiellement de la reconfigurabilité des HMS. Partant de l'architecture de référence PROSA, les auteurs montrent la nécessité d'un nouveau holon, le Holon Configuration. Sachant que la reconfiguration du HMS est un point clé pour le bon fonctionnement de l'approche, l'approche de la reconfiguration du système holonique de pilotage est calqué sur les capacités de flexibilité du système opérant. Les travaux présentent donc la structure de base de cette architecture holonique, ainsi que le détail des holons de base et du holon coopération. Enfin, une implémentation de ce système via un système multi-agent a été mise en œuvre (Wang *et al.* 2005b).

L'Institut d'Automatique de Shenyang travaille en collaboration avec la Northeastern University de Boston sur les HMS, avec toujours en ligne de mire cette problématique de la reconfigurabilité. (Huang *et al.* 2004a) présente une méthodologie HMS mise en œuvre par des technologies multi-agent sur une ligne d'assemblage et font le lien entre flexibilité, reconfigurabilité et techniques d'implantation de l'infrastructure du système opérationnel. (Huang *et al.* 2004b) décrit une plateforme de simulation numérique dédiée à la validation et à l'évaluation des performances du travail précédent. La ligne virtuelle d'assemblage peut être spécifiée, implémentée et analysée en fonction de multiples configurations.

L'Université de Technologie de Lanzhou conduit des recherches sur les problèmes d'ordonnancement et d'allocation de tâches dans les HMS. (Yang *et al.* 2006) décrit un algorithme hybride recuit simulé – PSO (*Particle Swarm Optimization* – (Poli 2007)) pour traiter de l'affectation des tâches dans les HMS. (Yao *et al.* 2006) propose un modèle en réseau de Petri temporisé du holon ordonnanceur en charge de la mise en œuvre d'un algorithme similaire, composé d'une partie PSO et d'une partie Algorithme Génétique, et appelé HPGA (*Hybrid Particle swarm optimization and Genetic Algorithm*). En fait, ce holon est une holarchie au sein de laquelle les interactions entre les holons (c'est-à-dire les contrats établis entre eux) représentent les contraintes temporelles pour satisfaire chaque ordre. En introduisant dynamiquement des individus dans la population de reproduction, la vitesse de convergence de l'algorithme est améliorée, et l'obtention de l'ordonnancement est donc plus rapide. Cet algorithme est détaillé dans (Zhao *et al.* 2007a). Dans (Zhao *et al.* 2006), le modèle du holon ordonnanceur est défini en Buffer-nets, une

nouvelle classe de Réseaux de Petri temporisés qui renforce les techniques de modélisation pour les problèmes ayant des caractéristiques considérées comme difficiles à modéliser.

Dans (Zhao *et al.* 2007b), l'ensemble de ces travaux est remis en perspective vis-à-vis des HMS. Il est rappelé que l'objectif de la recherche sur les systèmes de pilotage est de pouvoir s'adapter dans un futur proche aux conditions de production en personnalisation de masse : petits lots, délais courts. Cela implique un système de pilotage qui soit plus proche des équipements, plus robuste et tolérant aux pannes, plus flexible et reconfigurable au niveau des équipements mis en œuvre, plus flexible et adaptatif au niveau du mix de produits à fabriquer, plus efficace et efficient vis-à-vis des événements contingents survenant habituellement dans un système de production. En cela, la recherche d'un algorithme d'ordonnancement réparti sur les différents holons et doté des propriétés de rapidité des algorithmes génétiques, tel que le propose l'équipe de Qiuyu ZHANG est une proposition très intéressante.

• Mise en Œuvre des HMS *via* des Systèmes Multi Agents

Comme nous avons pu l'observer jusqu'à présent, la communauté *Holonic Manufacturing Systems* utilise fréquemment les Systèmes Multi-Agent (SMA). Par ailleurs, la communauté *Multi Agent Systems* s'intéresse de près au paradigme holonique et tente de s'approprier quelques concepts et propriétés qui en sont issus.

Nous allons tenter de faire le point à ce sujet. Qu'en est-il exactement des relations entre HMS et SMA ? C'est plus complexe qu'il n'y paraît, car il y a derrière cette question des enjeux scientifiques importants et des communautés très différentes : d'une part des producticiens, des biologistes et des sociologues coté HMS, et d'autre part des informaticiens coté SMA, mais également de très nombreuses communautés scientifiques utilisatrices, y compris des producticiens, des biologistes et des sociologues.

En cela, cette communauté SMA a tendance à se positionner de manière centrale. Par exemple, (Treuil *et al.* 2008) pose le ton dès le début de l'avant propos : *Depuis la fin des années 1970, se sont développées, dans différents domaines scientifiques, des pratiques de modélisation et de simulation qui possèdent en commun le fait de représenter de façon explicite des entités et leurs comportements sous une forme informatique et d'étudier, grâce à la puissance qu'offrent les ordinateurs actuels, les structures émergentes qui naissent, in silico, de leurs interactions virtuelles. Toutes ces pratiques n'utilisent pas exactement le même vocabulaire. Elles se décrivent «à base d'agents» (Parunak et al. 1998), «orientées-objet» (Uhrmacher 1997), «particulières» (Schweitzer 1997), «individu-centrées» (Grimm & Railsback 2005), «holoniques» (Koestler 1967) ou «multi-agents» (Drogoul et al. 2003). Nous les regrouperons, pour le moment, sous le premier terme.*

Ceci est assez courant au sein de la communauté SMA, qui est assez gloutovore : tout n'est qu'agent ! Par exemple, l'Intelligence Artificielle Distribuée (IAD) y est souvent présentée comme synonyme de Système Multi Agents. Pourtant, il existe également les réseaux de neurones artificiels ou les essaims particuliers qui relèvent eux aussi de l'IAD. Les pratiques de modélisation ci dessus évoquées relèvent-elles vraiment du paradigme holonique ?

Historiquement, le paradigme holonique est plus ancien que le paradigme agent, mais il n'a pas fait comme ce dernier l'objet de développements logiciels spécifiques par les informaticiens pour sa mise en œuvre. En Productique, l'intérêt pour les HMS est postérieur à l'apparition des SMA, mais il a été motivé par le besoin de passer outre certaines limitations conceptuelles de ces derniers, vis-à-vis des problématiques propres aux systèmes de production.

Avant de détailler tout ceci, rappelons quelques notions sur les agents.

Selon Jacques FERBER (Ferber 1995), un agent se définit comme étant 'une entité réelle ou virtuelle, évoluant dans un environnement, capable de le percevoir et d'agir dessus, qui peut communiquer avec d'autres agents, qui exhibe un comportement autonome, lequel peut être vu comme la conséquence de ses connaissances, de ses interactions avec d'autres agents et des buts qu'il poursuit'. Il précise ultérieurement qu'un agent évolue au sein d'un 'ensemble d'entités logicielles, éventuellement hétérogènes, qui possèdent des capacités propres de résolution de problèmes et qui sont capables d'interagir pour atteindre leurs buts' (Ferber 1999). Il existe deux types d'agents : les agents cognitifs (ils disposent chacun d'une base de connaissance comprenant l'ensemble des informations et des savoir-faire nécessaires à la réalisation de leur tâche et à la gestion des interactions avec les autres agents et avec leur environnement) et les agents réactifs (chaque agent possède un mécanisme de réaction aux événements, ne prenant en compte ni une explicitation des buts, ni des mécanismes de planification). Il existe une approche "mono-agent",

où le système est en fait composé d'un seul agent (bref, l'informatique entière relève du paradigme agent...) et l'approche multi-agents, où le système est composé de plusieurs agents. La tâche globale que réalise le système repose donc sur l'ensemble des agents et la solution émerge des interactions des agents au sein de l'environnement. Un SMA est un système constitué d'un ensemble constant ou non d'agents homogènes ou non qui interagissent dans et au travers d'un environnement. Non constant signifie que des agents peuvent s'insérer ou disparaître du SMA, et non homogène que les agents constituant le SMA peuvent être de nature hétérogène (bref, ils sont de différents types, au moins cognitifs et réactifs).

Nous reconnaissons dans ces définitions quelques traits communs et quelques différences vis-à-vis de ce que nous avons déjà vu sur les holons, aux paragraphes précédents. Pour aller plus loin, le tableau de synthèse de la figure suivante fournit un comparatif plus complet entre les deux paradigmes (figure 34) :

	Paradigme multi-agent	Paradigme holonique
Autonomie	Oui	Oui
Réactivité	Oui	Oui
Coopération	Les agents peuvent concurrencer et/ou coopérer avec d'autres agents	Oui : les holons ne rejettent jamais délibérément une coopération avec un autre holon
Pro activité	Oui	Oui
Type et ouverture de l'architecture	Oui, les architectures peuvent varier entre hiérarchie et hétérarchie...	Oui, les holarchies permettent de créer n'importe quel type d'architectures... Les architectures peuvent se superposer quand un holon appartient à plusieurs holarchies
Logique du comportement	Oui, mais parfois, certains agents ont des comportements purement réactifs	Oui, mais parfois, certains holons ont des comportements purement réactifs
Apprentissage	Oui, mais pas tous les agents ont des capacités d'apprentissage	Oui, mais pas tous les holons ont des capacités d'apprentissage
Mode de décision	Principalement par techniques cognitives ou issues de l'Intelligence Artificielle permettant une expertise générique	Mécanismes de décision souvent formalisés sous forme de graphes de décision ou de procédures définissant un comportement et dirigés par les événements
Assistance et abnégation	C'est une possibilité qui ne concerne pas tous les agents	Oui, un holon cherche à aider un autre holon, si cela ne va pas à l'encontre de ses propres intérêts et objectifs.
Mobilité	Oui, cela dépend de la capacité pour un agent à circuler sur le réseau informatique	Oui, mais la mobilité est totalement associée à celle de leur partie matérielle
Récurtivité	L'architecture n'est pas réursive. Cela dit, les SMA utilisent des artifices techniques pour remédier à cette carence	Oui. Un holon peut relever de plusieurs définitions de haut niveau (par agrégation et par spécialisation)
Séparation information et objet physique	Non, pas de séparation explicite et il n'y a pas de référence au système réel, qui peut parfois devenir un agent non implémenté	Oui, la séparation est explicite. Même si la partie physique est optionnelle, ces holons sont composés d'holons en ayant une...
Temps réel	Les agents peuvent être implémentés en temps réel, mais cela reste exceptionnel.	Faisant partie du bouclage avec la partie physique, les holons sont par définition en temps réel.

Figure 34. Comparatif entre paradigmes agent et holonique.

Malgré de nombreuses différences conceptuelles, les fondements – autonomie, réactivité et pro activité – sont

communs aux deux paradigmes, qui partagent une vision similaire de l'avenir des systèmes de production. Les différents points de vue ne sont pas nécessairement incompatibles, sans être pour autant équivalents. Ceci s'explique par des parcours scientifiques très différents entre ces deux paradigmes.

Les HMS ont été pensés pour pallier aux déficiences des systèmes de pilotage des systèmes de production, afin de répondre aux défis de l'avenir. Cette réflexion s'est faite sur la base globale de l'ensemble du système de production, c'est-à-dire sur l'ensemble de l'organisation du processus de production, et sur la prise en compte complète du matériel, du contrôle-commande et de l'intégration de l'humain dans l'organisation et le processus de décision. C'est une vision orientée par les tendances du secteur manufacturier et donc très spécifique à ce domaine.

Les SMA sont une technologie logicielle qui a été motivée par la recherche fondamentale relative à des questions concernant des aspects comme l'autonomie, la coopération, la formation des équipes... Ils sont donc applicables à un large éventail de domaines. La technologie des solutions logicielles elles-mêmes (plateformes multi-agent) n'impose pas de solution spécifique, mais propose un ensemble de concepts et de techniques de mise en œuvre du traitement de l'information, au service des solutions spécifiques au domaine considéré. En particulier, les systèmes multi-agents permettent de créer n'importe quel type d'organisation, de structures hiérarchiques rigides à plusieurs holarchies. En outre, les concepts et les techniques de systèmes multi-agents sont décrits algorithmiquement et sont prêts à être mis en œuvre.

Bref, les HMS et les SMA ont des approches similaires, avec des focus différents, mais complémentaires. Un constat similaire peut être établi dans le domaine de la génétique avec les architectures bioniques et le concept de 'modelon' (Da Silveira 2003).

Les premières expérimentations ont permis d'établir qu'effectivement, les deux paradigmes étaient très complémentaires (Bussmann 1998). Les HMS traitent de la structure globale du processus de fabrication, et en particulier de l'intégration des équipements, du contrôle et des hommes, alors que le SMA se concentre sur la conception du traitement de l'information dans un système de contrôle-commande et sur sa mise en œuvre informatique (figure 35).

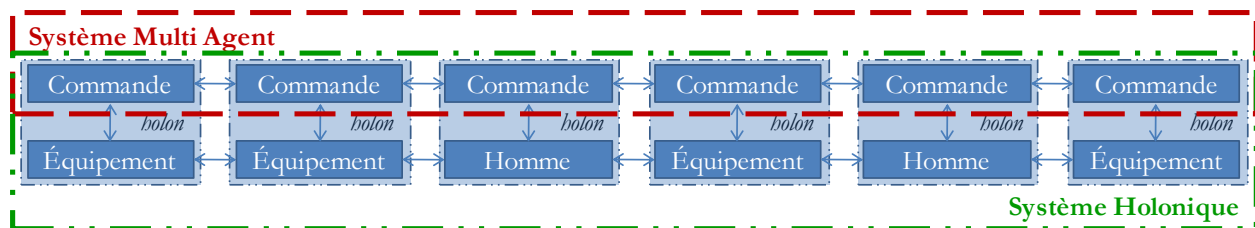


Figure 35. Vues 'agent' et 'holon' d'un système de production (d'après (Bussmann 1998))

Pour valider par simulation des concepts développés dans le paradigme HMS, les similitudes du paradigme SMA concernant la partie informationnelle et décisionnelle sont suffisantes. Les outils informatiques multi agents existent, ils sont nombreux et fonctionnent bien. Par ailleurs, il n'existe pas d'outil ou de plateforme spécifiquement dédié aux HMS. Il est donc tout à fait concevable que le paradigme SMA soit très largement utilisé par la communauté HMS pour valider des travaux effectués dans le paradigme HMS, la seule autre alternative résidant dans le développement en propre d'une plateforme spécifique, ce qui est plus compliqué à mettre en œuvre.

En fait, utiliser une plateforme multi agent existante présente les avantages de la rapidité d'obtention des résultats (les développements sont forcément plus courts et s'appuient sur des langages agents de haut niveau), de la fiabilité (les plateformes sont robustes, elles font l'objet de multiples tests par différents types d'utilisateurs), et de la 'partagabilité' (c'est-à-dire l'aptitude à pouvoir partager ses résultats avec d'autres scientifiques, qui peuvent alors les reproduire, les valider et les enrichir...). Par contre, il faut bien vérifier que la plateforme en question répond bien au cahier des charges correspondant aux besoins exprimés dans le paradigme holonique. En effet, pour réaliser le développement, la seule solution passera par l'utilisation des seules possibilités offertes par la plateforme : si cela ne convient pas, il faudra relaxer les contraintes ou adapter les concepts, qui peuvent alors perdre une part de leur

signification. Par exemple, on ‘oublie’ la partie opérative, ou au mieux, on l’idéalisera en l’émulant... Par ailleurs, le choix d’une plateforme multi agent peut s’avérer plus complexe que prévu, dans la mesure où un certain nombre de fonctionnalités seront inutiles, d’autres seront mal adaptées, voire incompatibles avec les besoins. Ceci donne lieu à de véritables discussions scientifiques, sous la forme de surveys : par exemple, nous pouvons citer (Tobias & Hofmann 2004) ou www.swarm.org/wiki/Software_templates.

A l’opposé, le développement d’une application logicielle propre est plus risquée, car plus difficile à programmer et à mettre au point, plus spécifique et donc *a priori* moins ouvert. Le principal avantage est de pouvoir concevoir et construire le système informatique correspondant le plus possible aux spécifications du système holonique envisagé.

Nous pouvons citer quelques exemples de mise en œuvre de HMS *via* des SMA.

(Heragu *et al.* 2002) propose une architecture hybride, où un agent/holon supérieur peut définir des plans optimaux, des agents/holons de base organisent leurs plans individuels et des agents/holons intermédiaires autorisent les plans individuels des holons qu’ils gèrent, en fonction du plan global.

Un ensemble de travaux ont été conduits autour de InteRRaP, un SMA développé dans les années 90 (Müller & Pischel 1993, Bussmann & Muller 1993, Bussmann 1998, Fischer 1999, Schillo & Fischer 2004). La robustesse et l’auto-organisation sont basées sur le fonctionnement d’InteRRaP, où chaque agent possède 3 couches décisionnelles (actions sociales, actions locales, comportements). L’auto-organisation y est le choix d’un agent de s’engager ou non, avec un ensemble d’agents, en utilisant un pattern d’interaction correspondant à une forme d’organisation. Dans (Fischer 2005), chaque couche (planification de la production, contrôle d’ateliers, contrôle de cellules, systèmes autonomes, machines) transmet des objectifs aux sous-couches sans contrôler si ces tâches sont effectivement réalisables. Pour une tâche donnée, les agents se coordonnent en formant un holon de tâche.

Parmi la quinzaine de plateformes multi agent existant actuellement, un certain nombre ont été utilisées pour mettre en œuvre des HMS. Citons par exemple JACK (Fletcher & Brennan 2002, Jarvis *et al.* 2003), JADE (Kotak *et al.* 2003, Lietão & Restivo 2006, Pannequin & Thomas 2006, Cossentino *et al.* 2007, Blanc *et al.* 2008, Giret & Botti 2009) ou encore MadKit (Rodriguez *et al.* 2007). Une très large partie des chercheurs de la communauté HMS a donc pris l’habitude de raisonner au niveau conceptuel dans le paradigme holonique, puis de penser mise en œuvre en utilisant les technologies agent, ceci en dépit (ou au mépris) des réductions conceptuelles que représentent l’absence de récursivité, de temps réel... Pire : pour certains d’entre eux, un holon n’est qu’un concept, et donc ne peut avoir d’existence réelle, donc informatique. Ceci est vraiment un comble du point de vue de la définition d’un holon, qui associe à cette partie informatique une partie... matérielle, donc forcément existante...

Tout ceci pourrait à terme évoluer, puisqu’une plateforme holonique, Xholon (Webb 2007), est en cours de développement (<http://www.primordion.com/Xholon/>). Cet outil, open source, flexible, multi-paradigme (UML 2, ABM, SBML, NN, GP, PSys, CA, ...), permettant la modélisation, la simulation, la conception, l’exécution, et la transformation, est plutôt orienté sciences du vivant et systèmes biologiques, mais reste ouvert à de multiples domaines d’applications. Développé en Java et supportant XML, XPath, MDA, DEVS... et tout outil type UML 2, les applications Xholon peuvent aisément former des systèmes complexes, soit conçus par une démarche *top-down*, soit obtenus par une évolution *bottom-up*.

Quelques exemples liés au domaine de l’automatisation ont déjà été testés (contrôle d’un ascenseur, par exemple), et cela devrait continuer, car Xholon est particulièrement appropriée pour les systèmes conduits par les événements. Il permet la prise en charge d’objets se déplaçant, pouvant être créés, détruits et modifiés, ayant leur classe modifiable durant l’exécution ou ayant besoin de créer dynamiquement de nouvelles classes et de nouvelles instances de ces classes. Xholon peut prendre en charge des applications dont le comportement est déterministe, mais il est surtout conçu pour être ouvert à tous les systèmes qui s’organisent eux-mêmes au moment de l’exécution, sans faire une référence exclusive à un métamodèle UML ou à un schéma XML.

Enfin, une dernière piste résulte de la convergence des deux paradigmes vers un paradigme unifié. Compte tenu de la forte similitude des concepts, il semble effectivement avantageux de combiner les deux paradigmes et d’utiliser des systèmes multi-agents ‘enrichis’ comme technologie pour l’opérationnalisation des HMS. Une revue de

littérature montre rapidement que cette voie rencontre un certain succès, tant du point de vue des Producticiens, pour les raisons de mise en œuvre évoquées précédemment, que du point de vue des Informaticiens, qui peuvent ainsi enrichir le paradigme multi-agent.

Cela dit, il y a encore des travaux à conduire pour progresser sur cette voie. En témoignent les différentes terminologies employées pour qualifier cette association.

L'expression la plus souvent rencontrée est *holonic multi-agent system* (Adam *et al.* 2000, Adam *et al.* 2001, Fischer *et al.* 2003, Shillo & Fischer 2003, Unland 2003, Shillo & Fischer 2004, Valencia-Jimenez & Fernandez-Caballero 2006, Cossentino *et al.* 2007, Rodriguez *et al.* 2007), ou encore *holonic multiagent-based system* (Metzger & Polaków 2007)

Mais il est possible de rencontrer l'inverse : sur la base de *Agent-based holonic xx*, nous trouvons : *Agent-based holonic design* (Kotak *et al.* 2003), *agent-based holonic architecture* (Wang *et al.* 05), *Agent-Based Holonic Production Control* (Leitão & Restivo 2002). Nous pouvons également trouver des expressions plus rares, comme *Agent-holon Oriented Methodology* (Moise 2008) ou *Holonic Agent Systems* (Gerber *et al.* 1999, Ören 2001).

L'expression qui semble néanmoins se dégager est donc HMAS, pour *holonic multi-agent system*.

Mais là encore, des interprétations nettement différentes sont à considérer. Ainsi, pour (Fischer 2003), dans un HMAS, le paradigme holonique sert au niveau conceptuel et le paradigme agent permet d'établir le code. Pour d'autres, majoritaires, les HMAS représentent un enrichissement du paradigme multi agent, par l'apport des concepts complémentaires venant du paradigme holonique.

Les recherches conduites en France sur les HMAS se situent dans ce second courant de pensée.

A l'Université de Valenciennes et du Haut Cambrasis, (Adam *et al.* 2001) propose de reprendre les règles de la Théorie des hiérarchies ouvertes d'Arthur KOESTLER en accord avec un point de vue multi agent. Ainsi, un HMAS peut être considéré comme un SMA ayant un comportement récursif et des définitions explicites de son comportement relativement à l'autonomie, la coopération et la stabilité.

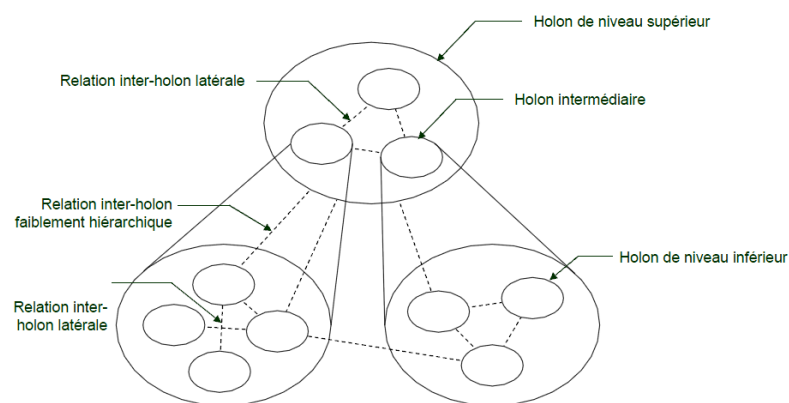


Figure 36. HMAS (d'après (Adam *et al.* 2001))

A l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, les travaux de recherche portent sur la définition d'un cadre de référence pour un SMA holonique (Rodriguez *et al.* 2007), c'est-à-dire un SMA qui selon le niveau d'observation, peut être vu comme une entité unique ou comme un groupe de holons en interaction.

Plusieurs aspects sont abordés dans ces travaux : la structure et la gestion d'un holon, la description des interactions et du comportement dynamique. Plusieurs applications de ces travaux sont présentées : le dimensionnement de réseaux radiomobiles, la simulation du trafic logistique interne à un site industriel, l'aide à l'implantation d'atelier...

- **Synthèse des approches HMS étudiées**

Le tableau ci dessous reprend des caractéristiques évoquées ci avant.

Nom	Références	QUOI	OU	QUAND	Entités d'Aide à la décision	Autres Entités	- Architecture <small>selon (Trentesaux 2009),</small> - Mise en œuvre	Mécanisme d'optimisation
		Entités type Produit	Entités type Ressource	Entités type Ordre				
PROSA	Van Brussel <i>et al.</i> 1998, Verstraete <i>et al.</i> 2008	Produit (holon statique, serveur d'informations)	Ressource : Usine, Atelier, Poste de travail, équipement	Ordre : OF, OA, lot...	Staff : Ordonnancement, MRP	Non	Classe II Systèmes Multi Agents	Négociation ou proposition <i>ad hoc</i> centralisée ou stigmergie
Metamorph	Maturana & Norrie 1996, Maturana & Norrie 1997, Shen & Norrie 1998, Maturana <i>et al.</i> 1999, Ulieru <i>et al.</i> 2000, Zhang <i>et al.</i> 2000	Ressource : Équipement ou Produit		Non	Médiateur	Non	Classe II IEC 61499 & DCOS	Négociation, régulation, logique floue
HCD	Wang 2001, Christensen 2003b, Marik & McFarlane 2005, Bal <i>et al.</i> 2006	Non	<i>Function Block</i> pour Equipement	Non	Function Block	Non	Classe II IEC 61499 & SMA	Mécanismes d'exécution ou négociation
ADACOR	Leitão <i>et al.</i> 2003, Leitão & Restivo 2006, Leitão & Restivo 2008	<i>Product</i> (logique)	<i>Operational</i> (physique) : Machine, équipement, poste, homme	<i>Task</i> (logique)	<i>Supervisor</i> (logique)	Non	Classe II SMA (Jade)	Négociations directes ou supervisées

Nom	Références	QUOI	OU	QUAND	Entités d'Aide à la décision	Autres Entités	- Architecture selon (Trentesaux 2009), - Mise en œuvre	Mécanisme d'optimisation
		Entités type Produit	Entités type Ressource	Entités type Ordre				
Fabricare	Sousa & Ramos 1999, Sousa <i>et al.</i> 2000, Sousa <i>et al.</i> 2004	Non	Resource :	Task : OF	Scheduling	Design, Sale, ProP, PP	Classe II SMA	Protocole d'interaction
HBCA	Jarvis <i>et al.</i> 2006	Part	Machine (JACK team) : Pick&Place, Fanuc, painter...	Order : WIP	CellBehaviour Agent		Classe II SMA (JACK)	Protocole d'interaction
Anemonia	Giret & Botti 2004	Product	Resource	Order	Staff		Classe II SMA (Jade) + IEC 61499	Protocole d'interaction
HSCS	Cheng <i>et al.</i> 2004a	Part	Shop Floor		HMES HERP	HIES Exchange Communi- cation		
CIPPS	Zhang <i>et al.</i> 2003		Ressource :	Task :	Initial Planning, C/P Coordination, Desision Making Detailed Planning P/P Coordination Production Scheduling	CAD	Classe II	

Figure 37. Tableau récapitulatif des principales approches des HMS.

2. PROPOSITION D'UNE ARCHITECTURE ISOARCHIQUE POUR LE PILOTAGE DES SYSTÈMES DE PRODUCTION

Après avoir présenté un panorama, certes non exhaustif, mais le plus large possible des recherches connexes à nos propres travaux, nous allons focaliser notre propos sur nos contributions relatives au concept d'isoarchie et à sa mise en œuvre pour le pilotage des systèmes de production. Après avoir rapidement évoqué le contexte qui nous a amené sur cette problématique, nous définirons le concept d'isoarchie appliqué au pilotage des systèmes de production ainsi que les différentes notions associées. Ensuite, nous détaillerons comment mettre en œuvre ce concept en accord avec le paradigme holonique et nous expliciterons les modèles de cette approche, de manière à clarifier tous les aspects du fonctionnement du pilotage que nous nous proposons.

2.1. Contexte des recherches présentées ici

Il y a peu de temps, (Cardin & Castagna 2009), citant nos travaux, les situait comme représentant une 'situation extrême' dans l'exploration des architectures distribuées de contrôle-commande : *'In the past few years, distribution of information and control was explored until reaching purely distributed isoarchic architectures (Pujo & Oummar 2008b)'*. Il est vrai, et nous venons de le constater dans le panorama effectué au chapitre précédent, la quasi-totalité des architectures que nous venons d'évoquer, quelle que soient les structures fonctionnelles qu'elles autorisent (de la structure hiérarchique classique avec des liens de subordination via le réseau de communication à la structure coopérative entre des constituants autonomes), comportent une dimension hiérarchique, même à titre de secours, dans la prise de décision hétérarchique.

Parallèlement à cela, mon parcours scientifique a commencé en 1987 dans une équipe de recherche dont les travaux portaient sur la décentralisation des systèmes de commande, c'est-à-dire sur la conception de systèmes de commande sans coordinateur central. Je suis toujours resté fidèle dans mes travaux ultérieurs au postulat selon lequel il était possible de commander et de piloter des systèmes automatisés sans pour autant faire appel à des mécanismes de décision centralisés ou même hiérarchisés. En cela, mes travaux ont toujours été marqués par la recherche de la suppression de mécanismes de décision hiérarchique ou de type maître-esclave.

- **Décentralisation des systèmes de commande**

Lorsque je suis arrivé au Laboratoire d'Automatique et d'Informatique de Marseille (LAIM) en 1987, le thème de la décentralisation des systèmes de commande était le thème principal des travaux. Un modèle permettant de représenter l'ensemble immatériel des algorithmes et logiciels contribuant à la prise de décision en commande et programmation des machines industrielles avait été mis au point et s'appuyait sur le concept de 'I_machine'. Une I_machine permet de décrire l'ensemble immatériel de la partie informative, c'est-à-dire les différentes fonctions logicielles implantées sur une unité de traitement informatique. Ainsi, une baie de commande industrielle pour une machine de production (Machine Outil à Commande Numérique ou Robot Industriel) pouvait être représentée par une I_machine centralisant toute les fonctions de commande et de programmation de la machine en question.

Dans une telle structure organisationnelle classique, les différentes fonctions de décision indiquent une décomposition ordonnée en strates superposées selon des niveaux de responsabilité décroissante, l'ensemble étant traversé par différents flux d'information. Les prises de décision vont du plus général au plus détaillé au fur et à mesure que l'on se rapproche du niveau du système physique, et correspondent à des horizons temporels de plus en plus courts (Jones & McLean 1986). Il est toutefois à remarquer que cette approche limite la portée et la nature des décisions et des interactions formalisées entre les différents niveaux de décision, et que comme il n'existe pas de fonction inverse permettant de connaître l'origine des décisions, il est difficile de revenir sur une prise de décision et l'approche centralisée reste valide uniquement dans le cas d'un environnement forcément stable.

Dans le contexte de l'apparition des Systèmes de Production Automatisés Flexibles (Eyraud *et al* 1988), il devenait évident d'explorer d'autres solutions de prise de décision permettant de favoriser l'adaptativité et la flexibilité des tâches.

Dans ce contexte, la décentralisation de la commande d'une machine de production était vue comme l'une de ces solutions. À l'époque, elle est vue comme la duplication de I_machines associées au contrôle-commande et à la programmation de différents organes internes de cette machine. Ainsi, pour l'étude des architectures de commande décentralisée, le concept de I_machine d'exécution a été développé par (Brun-Picard 1988). Il a montré à cette occasion comment organiser les opérations de calcul de manière décentralisée, en parallélisant les calculs sur chacune des I_machines associées à chacun des axes commandés de la machine automatisée. Daniel BRUN-PICARD présente la nécessité de structurer les fonctions internes de la I_machine, appelée micro-machine, en séparant par exemple les fonctions de communication des fonctions de décision ou d'action. Il montre également comment travailler sur le modèle de commande globale de la machine, qu'il convient de 'découper' pour le répartir sur les différentes I_machines d'exécution. Ceci a été particulièrement détaillé au niveau de Jacobien utilisé dans le modèle de commande d'un robot industriel. Ce découpage fait apparaître un type de décision qu'il convient de prendre immédiatement, sans trop calcul, de manière réflexe - ce sera le rôle de la micro-machine de 'décision réflexe', traitant des problèmes de régulation de mouvement) -et un type de décision nécessitant plus de calculs et d'expertise - ce sera le rôle de la micro-machine de 'décision réfléchie', pour traiter de problèmes de trajectoires, de modes de marche...

Coté mise en œuvre, Pierre MICHEL (Michel 1988) avait travaillé, en collaboration avec la société Cybernetix, sur le développement du contrôleur d'axe ARIEL permettant de mettre en œuvre une I_machine d'exécution. Par ailleurs, Jean-Michel OLIVE (Olive 1990) et Jean-Claude CARMONA (Carmona 1990) avaient déployé l'approche sur une machine outil à commande numérique. Ma contribution sur ce thème avait commencé par la définition de l'interface homme-machine d'une machine outil à commande numérique décentralisée (Pujo 1988).

Ensuite, consécutivement à l'étude métrologique des défauts géométriques de fonctionnement d'un robot industriel (Pujo 1993) et à une proposition de modélisation causes-effets fondée sur l'étude du comportement technologique des composants d'un robot industriel, j'ai pu travailler à l'élaboration d'un modèle géométrique permettant une correction de consignes dans le cadre d'une commande décentralisée (Pujo 1994). Cette commande décentralisée, correctrice des défauts géométriques de trajectoire d'un robot industriel, a été ensuite approfondie et améliorée lors du travail doctoral de Bagher ASGHARI (Asghari 1998). Tout ceci nous a permis de remettre en cause l'architecture mécanique des robots industriels, et de proposer une architecture mécatronique alliant à des composants mécaniques moins rigides, donc déformables, une commande décentralisée intégrant des éléments de correction de ces déformations (Massé *et al.* 1994). Nous avons ainsi pu envisager la conception orientée mécatronique de robots industriels ayant un meilleur rendement massique et conçus sur des bases modulaires (Olive *et al.* 1995), par association d'opérateurs de mouvement autonomes.

- **Extension à la décentralisation des systèmes de pilotage**

Parallèlement à ces travaux sur la commande décentralisée, un des objectifs du LAIM était d'étendre les concepts au pilotage de systèmes de production intégrant plusieurs machines, par exemple des cellules flexibles de production. L'approche envisagée dans le laboratoire (Bertrand *et al.* 1988) était de déployer l'ensemble des niveaux de pilotage de la production - tels que ceux décrits dans (Mesarovic *et al.* 1970, Avenier 1984, Giard 1988... - figure 3) - dans chaque I_machine d'exécution. Ceci restait toutefois particulièrement délicat à mettre en œuvre.

Une collaboration avec Daniel BRUN-PICARD a abouti à une première publication (Bertrand *et al.* 1990), qui remettait en cause cette approche. La nouvelle proposition formulée était d'aborder la décentralisation du pilotage 'niveau de décision' par 'niveau de décision'. Dans un premier temps, la cible fixée était les Systèmes de Production Automatisés Flexibles, en cherchant à améliorer tout particulièrement leur réactivité. À partir de là, nos travaux ont étendu le champ des I_machines au pilotage et élargi leur polyvalence, en particulier

par l'usage de I_machines de création pour générer et organiser les tâches de commande à exécuter par les I_machines d'exécution.

Dans (Pujo & Bertrand 1993), j'ai développé la notion de Génération de tâches, implantée dans des I_machines de création associées à chaque machine-outil à commande numérique d'une cellule flexible. Face au problème du pilotage global de la cellule flexible, nous avons établi qu'il convient de 'découper' le problème de la Génération de Tâches pour le répartir sur les différentes I_machines de création. Ce découpage a fait apparaître deux problématiques distinctes : d'une part, la Génération des trajectoires opératoires, obtenues par la transformation d'une Tâche définie à un haut niveau en un ensemble ordonné de mouvements à exécuter sur une machine donnée - ce sera le rôle de la micro-machine de 'génération réflexe', traitant des problèmes de création des cycles de travail et des mouvements associés) - et d'autre part, la Génération multi-machines, consistant à effectuer l'affectation des Tâches sur une machine-outil donnée, lorsque plusieurs machines-outils ont des capacités de traitement et de transformation similaires - ce sera le rôle de la micro-machine de 'génération réfléchie'.

Il est à noter que nous trouvons dans (Pujo & Bertrand 1993) la première description du mécanisme décentralisé de génération réfléchie, mécanisme permettant la mise en concurrence des ressources associées aux I_machines de création.

Cette première proposition a trouvé un écho dans les travaux de doctorat de Nicolas BROISSIN, qui a permis d'opérationnaliser tout ceci au travers de diverses plateformes d'expérimentation (Broissin 1999).

Il est à noter un certain nombre de points saillants portés par ce travail, et d'ailleurs largement sous exploités à l'époque en termes de diffusion scientifique :

- Pour prendre en compte la notion de réactivité, force est de constater que les approches proposées s'appuient toujours sur les aspects temporels, certes importants, mais qu'elles négligent les capacités technologiques des machines, qui sont tout aussi importantes dans l'exécution des tâches affectées au Système de Production. Nicolas BROISSIN formule alors le problème en termes de « métier » et non de moyens mis en œuvre.
- Pour accroître la réactivité du pilotage d'un système de production en généralisant la notion de décentralisation au pilotage, la décomposition d'une tâche globale en macro-tâches de production est une première piste de réflexion. Elle permet, au travers de l'approfondissement des notions de 'génération réflexe' et de 'génération réfléchie', une modélisation poussée pour chaque micro-machine de génération. Le modèle fonctionnel de la micro-machine de 'génération réflexe', plutôt lié à la notion de Métier d'une machine de production, et le modèle fonctionnel de la micro-machine de 'génération réfléchie' ont été décrits de manière formelle par des Réseaux de Petri. Jusqu'alors, les I_machines n'avaient fait l'objet d'aucune modélisation formelle, mais seulement par des schémas de principe.
- Le système de pilotage ainsi conçu doit être capable de reconstituer à tout moment le raisonnement d'expertise qui a permis de générer les consignes pour les I_machines d'exécution, tout en gardant une grande simplicité pour permettre une remise en cause, une adaptation ou la génération d'une nouvelle solution. Cette propriété permet une réactivité totale et est obtenue en déportant le plus possible la décision vers les éléments les plus bas de la cellule de production.

Un modèle général du système de pilotage décentralisé, intégrant deux types de ressources de production – ressource d'usinage ou de transformation, type machine-outil, et ressource de transitique, type robot industriel – ainsi qu'une représentation des messages échangés, a été proposé sous la forme d'un Réseau de Petri Coloré (Christensen *et al.* 1997). Ce modèle RdPC a été présenté dans (Pujo *et al.* 1999) et est repris dans la figure 38.

La difficulté rencontrée pour modéliser la génération réfléchie de tâches provient à la fois de l'architecture décentralisée de la génération de tâches, du partage et de la circulation des informations nécessaires et enfin de l'hétérogénéité des MdP intervenants dans l'exécution d'une Tâche globale – ceci étant particulièrement lié à la nécessaire alternance entre tâche de transformation et tâche de transitique.

Toutes ces contraintes ont nécessité une modélisation formelle des mécanismes de génération réfléchie visant à satisfaire l'expression de mécanismes séquentiels, supportant le parallélisme et la synchronisation, autorisant la modélisation des actions de communication. Ensuite, nous avons fait le choix d'une

modélisation à la fois suffisamment proche d'un modèle informatique pour permettre son implémentation et suffisamment abstraite pour appréhender les mécanismes décisionnels décentralisés, doit permettre une étude indépendante du nombre de I-Machines décentralisées, selon un formalisme suffisamment rigoureux pour envisager la simulation du modèle et vérifier sur des jeux de données que son comportement est bien conforme aux spécifications.

En référence à ces propriétés, le choix des Réseaux de Petri Colorés permet, une fois les modèles de génération terminés, de les replier par rapport à chaque I-Machine, et ainsi d'obtenir un modèle complet et lisible (compact) associant tous les types de Machines de Production autour d'un même modèle, indépendamment de leur nombre et de leur nature (hétérogénéité).

Enfin, ce modèle, lorsqu'il est simulé à l'aide d'un simulateur de RdP Colorés (*DesignCPN*), permet d'associer une dimension temporelle à l'évolution des états, et donc de développer un modèle informatique conforme aux spécifications et de valider par simulation les mécanismes de communication ainsi que la logique d'appel à la négociation et à l'exécution.

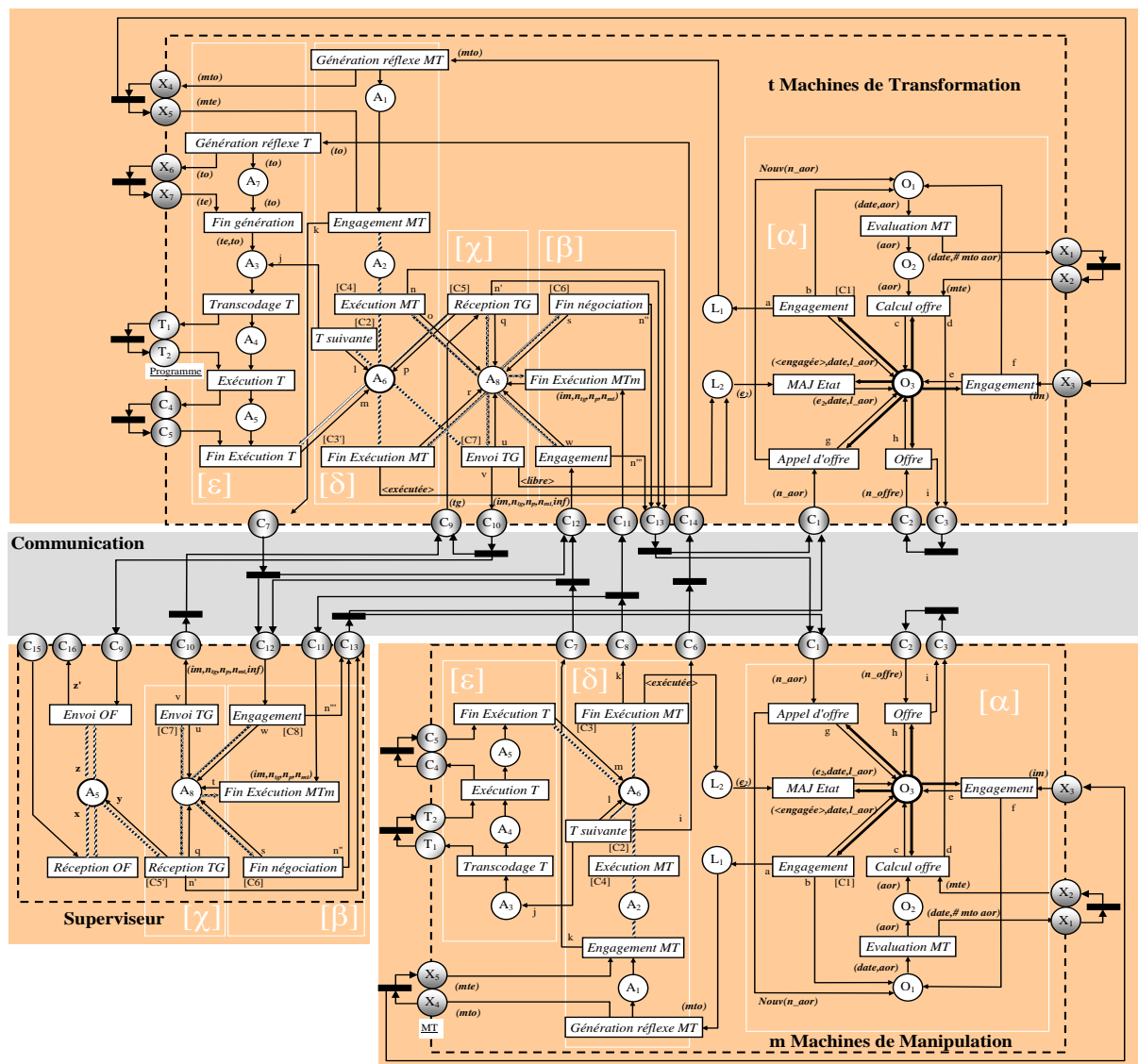


Figure 38. Modèle RdPC d'un pilotage par génération décentralisée de tâches (d'après (Pujo *et al.* 1999))

Le modèle de la figure 38 représente une cellule flexible comprenant t machines de transformation, entre lesquelles les flux de produits sont pris en charge par m machines de manipulation (robots industriels, robots

mobiles...), ainsi qu'un poste de supervision assurant les entrées – sorties de la cellule et donc les liaisons avec l'environnement du reste de l'atelier. Chaque Machine de Production est dotée d'une couleur différente, les algorithmes émanant du RdPC étant dupliqués dans les I-machines associées. La communication se fait par diffusion, de la I-machine émettrice vers toutes les autres I_machines. Le réseau 'communication' représente alors l'émission et l'utilisation fonctionnelle des messages échangés.

Ce modèle représente essentiellement la micro-machine de 'génération réfléchie', mais en montrant les appels à la micro-machine de 'génération réflexe', aux I_machines d'exécution et au module de communication inter I_machines. Nous pouvons repérer le module d'affectation des macro-tâches $[\alpha]$, le module d'appel à l'affectation $[\beta]$, qui initie le processus d'affectation d'une macro-tâche, et les modules d'appel à l'exécution de la tâche globale $[\chi]$, d'une macro-tâche $[\delta]$ et d'une tâche effecteur $[\epsilon]$, qui gèrent la décomposition opérationnelle du travail. C'est le module effecteur $[\epsilon]$ qui communique aux I_machines d'exécution concernées les trajectoires à mettre en oeuvre.

Nous obtenons *in fine* une modélisation par RdPC de tout ce mécanisme de génération et d'affectation de tâches de production. Par des techniques de *Model-Checking* sous *DesignCPN*, le mécanisme a pu être validé avant implémentation informatique sur des plateformes de test.

• Décentralisation des fonctions de pilotage : synthèse et limites

Nous avons vu dans ces approches par le modèle des I_machines qu'elles assurent des fonctions de synchronisation, de coordination, de coopération et/ou de génération de tâches. Ce sont des fonctions collectives et interactives de décision qu'un système de pilotage doit assumer dans un système de production. Nous pouvons les classer en deux types. Tout d'abord, il existe les fonctions de mise en œuvre de solutions d'évolution du système en fonction d'un objectif commun, telles que la synchronisation et la coordination. Ensuite, il existe les fonctions d'émergence de solutions, visant à définir un cadre d'évolution satisfaisant en vue d'un objectif à atteindre, telles que la coopération sous tous ses différents aspects et la génération de tâches.

La synchronisation vise à assurer un rendez-vous entre des entités ayant des actions distinctes mais concertées. Cet accord sur une même unité de temps peut s'exprimer de deux manières distinctes, mais cohérentes : par attente ou par lancement simultané. Par attente, nous entendons que plusieurs des branches de l'arbre de décision vont se synchroniser autour d'un point de rendez-vous, c'est-à-dire qu'une fois arrivées en ce point, elles vont attendre que l'ensemble des autres branches y soit arrivé également pour continuer leur propre progression. Le lancement simultané signifie que plusieurs branches vont démarrer en même temps à partir d'un événement déclencheur. Dans les deux cas, la synchronisation se résume au partage d'un seul instant lié à un déclenchement d'activité entre entités.

La coordination vise également à assurer un accord temporel entre des entités à l'occasion d'une même action nécessitant leur participation collective, mais devant maintenant s'inscrire sur toute la durée de l'action. En effet, le déroulement simultané de chaque branche décisionnelle doit correspondre à une cohérence globale à chaque instant de l'action : il s'agit donc d'une synchronisation continue ou suffisamment fréquente pour le paraître, et cela durant toute l'évolution parallèle de chaque entité. L'association qui en résulte permet d'assurer la performance globale de l'action assurée collectivement.

La coopération va plutôt se focaliser sur l'organisation des tâches en termes de répartition, d'allocation et d'affectation d'actions à des entités ressources, et à ce titre, ne suppose pas le partage direct d'un même objectif, mais plutôt la recherche d'un cadre de solution permettant de l'atteindre. Il en résulte une distribution 'en bonne intelligence' des actions à accomplir et cela va déboucher sur des décisions d'actions entraînant des synchronisations et des coordinations, selon différents mécanismes de coopération. Parmi ces mécanismes, nous pouvons citer comme cadre de prise de décision l'attribution, la négociation, le partage d'information, la mise en concurrence, la médiation ou l'arbitrage de conflits... selon les capacités décisionnelles dont seront dotées les entités en coopération.

La génération est une fonction de création, en ligne, des actions à enchaîner pour réaliser une action, en fonction de son cahier des charges. Il ne s'agit plus d'envisager une action comme préalablement prédéfinie lors des étapes de préparation du travail, mais comme pouvant être construite en temps réel, en fonction de

l'objectif de valeur ajoutée qu'elle représente et des possibilités effectives des ressources qui en auront la charge. Pour cela, les entités décisionnelles associées aux ressources disposent de règles de génération, basées sur des compétences et capables d'identifier chaque situation, d'élaborer des solutions localement optimales dans le respect d'un certain nombre de critères globaux de coopération. Ces règles peuvent aller jusqu'à la prise en compte de considérations purement technologiques. Nous pouvons retrouver la génération au niveau mono machine, pour transformer la tâche de production d'un équipement en consignes pour ses constituants, ou au niveau multi machines, pour transformer le plan de charge d'une unité de production en séquences d'actions pour ses équipements.

Ces fonctions peuvent être décentralisées, au sens de la définition ci-dessous :

Dans un ensemble d'entités considérées à un certain niveau N de décision, reliées entre elles par une fonction commune de synchronisation, de coordination, de coopération et/ou de génération de tâches, nous parlerons de fonction décentralisée lorsque les prises de décision concernant ce niveau N ne seront pas prises au niveau $N+1$ de décision, mais transférées au niveau N lui-même.

Cette définition permet de distinguer la distribution de la décentralisation des mécanismes de prise de décision. Même si ce sont des concepts voisins, ayant en commun l'abandon de liens de subordination hiérarchique traditionnellement en place dans les systèmes centralisés de pilotage (Mesarović *et al.* 1970) (figure 39a) au profit de liens hétérarchiques (Trentesaux 2007), le concept de décentralisation se distingue toutefois de celui moins contraignant de distribution par une organisation fonctionnelle basée sur la duplication de mécanismes de décision identiques sur toutes les entités constituant le système de pilotage (figure 39b). Certaines fonctions sont reproduites à l'identique sur toutes ces entités, d'autres conservent un même objectif et sont adaptées à chaque type d'entités. Toutes font l'objet d'un paramétrage permettant d'adapter ces mécanismes de décision à leurs propres caractéristiques. Pour rappel, le concept de distribution en informatique désigne un ensemble d'agents logiciels spécialisés et interactifs, formant un tout cohérent. La décentralisation est donc un concept purement architectural qui ne se réduit pas seulement à l'existence de capacités de communication.

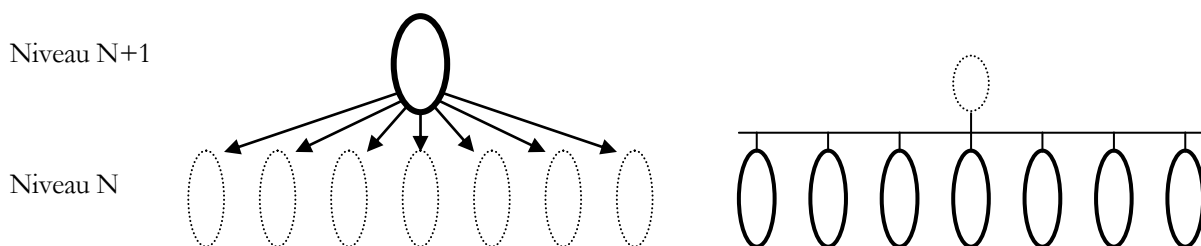


Figure 39. (a) : prise de décision centralisée ; (b) : prise de décision décentralisée

Forts de ces concepts, nous avons envisagé de nouvelles applications au concept de pilotage décentralisé.

En particulier, nous nous sommes intéressés à partir de 2000 à des systèmes de production qui sortaient du cadre strict des cellules de production à la fois automatisées et flexibles. Par exemple, nos résultats dans les cellules de production montraient que nos mécanismes de pilotage par génération décentralisée des tâches permettaient d'obtenir automatiquement un excellent lissage de charge. Par ailleurs, le fonctionnement observé dans les systèmes de supply chain montrait de graves problèmes de rupture de charges, avec des dysfonctionnements qui étaient amplifiés par l'effet 'bullwhip' (Agrawal *et al.* 2009). Il nous a semblé alors intéressant de travailler sur des chaînes logistiques plus réactives, plus dynamiques, mieux équilibrées, car intégrant des mécanismes de pilotage décentralisé inspirés de nos travaux antérieurs.

Les fondements de cette proposition étaient posés dans (Ounnar & Pujo 2001), avec la description d'un mécanisme décentralisé de pilotage de la relation donneur d'ordre/fournisseurs. Le principe en était le suivant : la relation donneur d'ordre/fournisseurs représente un maillon de la *supply chain*, et le donneur d'ordre, comme son nom l'indique, pilote de manière hiérarchique les échanges. Le plus souvent, c'est un pilotage effectué en fonction de ses propres contraintes, avec un choix du (des) fournisseur (s) quasiment

statique, mais avec une grande variabilité en termes de volumes et de délais, le tout sans tenir compte ni même avoir la moindre idée des contraintes des fournisseurs. L'idée développée a été de transférer aux niveaux des fournisseurs, qui doivent alors travailler ensemble, la prise de décision concernant l'affectation d'une offre à tel ou tel fournisseur... Bien entendu, il faut que cette prise de décision se fasse de manière équitable, transparente, automatique... tout en respectant l'intégrité et la confidentialité de certaines données propres à chaque fournisseur.

L'extension de ce principe à l'ensemble de la chaîne logistique a abouti à la définition de la notion de réseau partenarial logistique (Ounnar & Pujo 2005), approfondi dans le cadre des travaux de Doctorat de Lynda MEKAOUCHE (Ounnar *et al.* 2007, Mékaouche 2007, Mékaouche *et al.* 2009, Ounnar *et al.* 2009).

Toutefois, ces travaux ont marqués une véritable rupture avec nos travaux antérieurs, en particulier vis-à-vis du modèle des I_machines. En effet, nous avons constaté un certain nombre de défauts et de limitations qui nous ont encouragés à chercher d'autres approches :

- tout d'abord, le modèle des I_machines, initialement pensé pour les niveaux bas de la commande, s'adaptait de plus en plus difficilement au fur et à mesure que nous cherchions à l'appliquer à des niveaux de décision de plus en plus élevés,
- les modèles élaborés n'étaient pas assez génériques sur le plan fonctionnel, c'est-à-dire qu'ils ne pouvaient pas s'adapter à tout type de système de production sans qu'il n'y ait besoin d'effectuer d'importantes modifications,
- le modèle des I_machines n'impactait que les ressources automatisées et réduisait toute autre entité à un ensemble de données à éventuellement exploiter et à actualiser : il n'offrait pas assez de généricité au niveau des entités décentralisables, entraînant des mélanges conceptuels dans nos RdPC (par exemple, le module [δ] (figure 38) mêle des données produits, des données processus...),
- enfin, ce modèle n'était pas du tout relié à des paradigmes scientifiques reconnus (HMS, SMA...), ce qui limitait sa diffusion scientifique.

Parallèlement, à la même époque, nous avons commencé à étudier l'approche holonique et les nombreux modèles HMS développés.

Sans vouloir synthétiser ces différents modèles, nous avons observé qu'un certain nombre de primitives apparaissaient comme des invariants fonctionnels pour un holon ou toute autre entité de pilotage décentralisée. Au cœur du fonctionnement de cette entité se situe un module de gestion, qui organise le fonctionnement de tous les autres modules. Parmi ces derniers, nous retrouvons impérativement un module de communication, qui assure les échanges avec les autres entités, un module d'interface avec l'environnement, avec des entrées – sorties sur par exemple le matériel en relation avec l'entité, et un module de traitement logique dont l'objectif est de gérer la prise de décision de l'entité (figure 40)

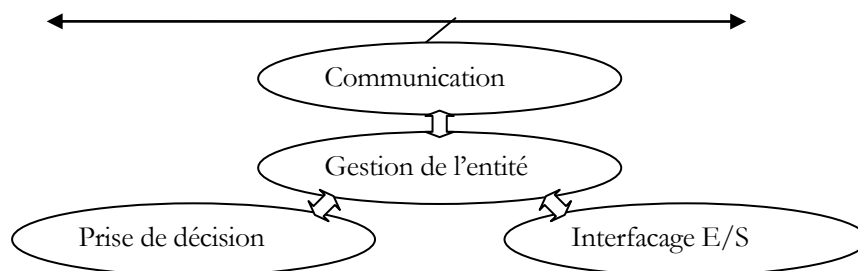


Figure 40. Organisation interne d'une entité décentralisée ou d'un holon

Nous avons par ailleurs rencontré en 2004 lors d'un congrès Paul VALCKENEARS, qui a accepté d'examiner nos travaux et qui a pointé un certain nombre de limitations que nous avions également ressenties. Cela nous a confortés dans l'idée d'explorer plus en détail le paradigme holonique.

In fine, l'approche holonique présentait un certain nombre d'intérêts majeurs, comme par exemple :

- des similitudes fortes sur certains aspects avec le modèle des I_machines,

- la prise en compte dans le mécanisme collectif de prise de décision d'entités de natures fondamentalement différentes, tels que des produits, des ressources ou de ordres,
- la possibilité d'une dynamique architecturale forte, avec ajout, déplacement et suppression d'entités,
- la possibilité, très peu étudiée dans la littérature HMS, d'une architecture en '*flat holonic form*',
- la possibilité d'inclure dans la génération de tâches des considérations orientées 'métier', issues de la connaissance du procédé et des interactions produit-ressource (figure 17)...

Cela nécessitait toutefois une certaine remise à plat de notre approche : la structure coopérative entre des constituants autonomes dépend de l'interopérabilité de ces constituants mis en réseau, c'est-à-dire de leur capacité à interagir : compatibilité des protocoles, mise en forme des données, performances temporelles, connaissance des autres composants. Or, nous n'avions travaillé jusque là qu'en termes de commande et de pilotage de ressources automatisées. Il fallait donc travailler pour intégrer la collaboration avec de nouvelles entités, telles que les produits, les ordres de fabrication ou même des ressources de nature différentes, comme des postes manuels ou servis par un opérateur, ou encore des usines complètes.

Par ailleurs, l'approche holonique reste avant tout sur le plan de la prise de décision une approche 'hybride', associant hétérarchie et hiérarchie, et se réclamant même comme étant la synthèse du meilleur des deux mondes (Bongaerts *et al.* 2000).

Ceci pose un problème vis-à-vis d'approches qui se voudraient totalement décentralisées.

Force est de constater, le plus souvent, qu'un lien hiérarchique fonctionnel subsiste dans les HMS et que certains constituants (holons) en coordonnent d'autres. En fait, dans l'approche holonique, il est recherché dans l'agencement de ces holons de production un compromis entre une structure hiérarchique décisionnelle et une structure hétérarchique opérationnelle, dans la mesure où la coopération des holons « intelligents » de bas niveau reste néanmoins coordonnée par des holons hiérarchiquement supérieurs (Valckeneers *et al.* 1994).

Un premier pas conséquent pour aller à l'encontre de cette vision 'maître-esclave' des systèmes holoniques est apporté par le modèle de référence PROSA :

- PROSA autorise les décompositions hiérarchiques (mécanismes d'agrégation et de spécialisation), ce qui ne correspond pas pour autant à une hiérarchisation décisionnelle obligatoire.
- Par ailleurs, l'appel aux Holons Staff, qui utilisent quand à eux des mécanismes de traitement centralisés, issus du paradigme hiérarchique, n'est pas obligatoire. Lorsque les Holons Staff ne sont pas sollicités, cela signifie que le mécanisme de coopération entre les holons de base est suffisant pour résoudre les problèmes d'organisation du système de production, c'est-à-dire :
 - soit le système de production est sous chargé,
 - soit que les conditions de chargement sont relativement simples,
 - soit que les perturbations observées sont d'amplitudes suffisamment faibles pour obliger à une remise en cause du fonctionnement envisagé.

Quand les Holons Staff sont sollicités, c'est qu'il y a un problème de fonctionnement suffisamment important au niveau des holons de base pour qu'ils ne puissent le résoudre seuls. Pour résoudre seul le problème, le holon Staff utilise alors des algorithmes conventionnels qui fonctionnent tous selon une vision hiérarchique 'maître-esclave', et le résultat obtenu provient d'un niveau N+1 d'analyse. Toutefois, ce résultat n'est pas imposé, il sert seulement de plan de référence aux holons qui sont théoriquement libres de suivre ou non ce plan. Il n'empêche que le mode d'élaboration de ce plan est hiérarchique – centralisé, et que sauf circonstances *ad hoc*, les autres holons n'ont aucune raison de ne pas suivre ce plan...

2.2. Concept d'Isoarchie

Nous voyons bien que PROSA n'est pas tout à fait adapté pour servir de base à nos propres investigations sur les systèmes de pilotage sans structure décisionnelle hiérarchique.

Nous proposons un pas supplémentaire, en s'astreignant à supprimer toutes traces de décisions prises hiérarchiquement dans l'architecture de pilotage envisagée. Pour cela, nous allons commencer par étudier les notions d'auto-organisation et d'émergence. En effet, ces deux notions sont centrales dans un processus décisionnel où disparaissent la notion de subordination et les relations 'maître-esclave'. Ensuite, nous donnerons une définition du concept d'Isoarchie. Nous poserons ce concept comme une extension du concept de décentralisation que nous avons déjà présenté auparavant.

- **Auto organisation et Émergence en Productique**

L'auto organisation et l'émergence sont deux thèmes qui intéressent fortement de très nombreux chercheurs, en provenance de nombreuses communautés scientifiques (Dalenoot 1989).

Dans le domaine de la Productique, ce sont des thèmes qui apparaissent comme des moyens pour augmenter la performance des systèmes de production, soit en termes de rendement, soit en termes de qualité de service. En effet, les évolutions successives du contexte industriel de production, telles que la plus grande variabilité des marchés ou le besoin de satisfaction des clients, conduisent l'exploitation des systèmes de production à la recherche d'une meilleure productivité, notamment au travers de l'évolution technologique des procédés, de l'automatisation de leur mise en œuvre, de la flexibilité de leur exploitation et plus récemment de leur réactivité (aptitude à la réaction).

En effet, la durée de vie des produits est de plus en plus courte et leurs variantes de plus en plus nombreuses. Ces nouvelles caractéristiques de production nous contraignent à revoir les stratégies de production de masse.

En fait, la production s'envisage aujourd'hui autour d'une production de petites quantités dans une famille de pièces avec beaucoup de variantes, le tout en réduisant les stocks tampon d'encours. Par ce faire, le système de production doit être plus flexible, c'est-à-dire qu'il doit être capable de traiter facilement des productions variées et variables.

Ce cadre de perturbations de fonctionnement, externes au système de production, se regroupe sous les termes de flexibilité du produit et flexibilité capacitaire (Jubin 1994, Ounnar 1999). D'autres événements viennent perturber les composants internes du système et nécessitent alors son adaptation : il s'agit par exemple des indisponibilités de ressources dues à des actions de maintenance préventive ou corrective, ou encore à des temps de préparation ou de fabrication mal évalués.

Nous parlerons ici de flexibilité opérationnelle, liée essentiellement à la mise en œuvre de la production sur le système physique dans un contexte perturbé. C'est le système de pilotage qui doit assurer la flexibilité nécessaire à la prise en compte de ces événements, prévus, prévisibles ou imprévus. Cette flexibilité du système de production, au sens de (Baboli 1999), signifie la capacité à changer rapidement de type de pièces produites, à supporter simultanément différents types de pièces, à changer le parcours des objets dans le système de production (leur flux), à produire de nouveaux types de pièces ou à adapter l'activité productive au volume réel de la production et à son contexte (Pujo & Bertrand 1993).

Face à de telles contraintes, une organisation centralisée de la prise de décision est peu adaptée, car la recherche d'une solution est un problème complexe, nécessitant à la fois un grand nombre d'informations, la prise en compte de règles de décision sophistiquées et la remise en cause continue par les événements survenant après la dernière solution obtenue. Le problème est encore plus crucial lorsque l'obtention de la solution est contrainte par des aspects dynamiques forts tels que la réactivité et la robustesse. C'est donc dans ce contexte que sont étudiées actuellement des solutions fondées sur la notion d'auto organisation.

La notion d'organisation doit être précisée pour définir celle d'auto organisation. L'organisation est un aspect fondamental d'un système, elle concerne la façon dont les composants du système et surtout l'interdépendance et les interactions entre les composants sont définies, structurées et évoluées. Un système de production est organisé lorsque chacune de ses entités constitutives a un comportement totalement formalisé ne dépendant donc que des stimuli provenant d'ordres externes émis par un superviseur qui gère la coordination de l'ensemble (Titli 1979). Cette approche de la prise de décision est par nature fortement centralisée, puisque le superviseur génère au niveau N+1 l'ensemble des ordres nécessaires à la mise en action des entités du niveau N.

Dans la communauté HMS, la notion de système auto organisé apparaît telle que celle d'un système non-coordonné par l'extérieur. Les éléments y sont doués d'autonomie et y exécutent des tâches ensemble, en interaction et compréhension mutuelle ; la somme, ou combinaison, des tâches individuelles permet de générer un ordre, un bien ou un service plus global. D'une manière plus générale, le concept d'auto organisation est défini selon (Bonabeau & Theraulaz 1994) comme le *'processus au cours duquel des structures émergent au niveau collectif (apparition d'une structure à l'échelle N+1 à partir d'une dynamique définie à l'échelle N) à partir d'une multitude d'interactions entre individus, sans être codée explicitement au niveau individuel'*.

L'objectif de l'auto-organisation est de permettre l'évolution dynamique et autonome d'un système existant, en fonction du contexte de façon à en assurer la viabilité.

Elle permet aux entités composant le système de s'adapter à leur environnement soit par spécialisation des fonctions (apprentissage), soit par modification de la topologie d'un groupe ou d'une hiérarchie, et des interactions correspondantes. Ceci donne naissance à un nouveau modèle d'organisation : l'auto organisation se traduit par la dynamique de modification des hiérarchies composant le système.

Nous pouvons rajouter qu'en cela, l'auto organisation représente un bouclage cybernétique de haut niveau, avec comme critère d'évaluation de la performance la constante de temps, c'est-à-dire le temps que met le système pour se réorganiser face à l'évolution de son environnement, de ses sollicitations ou de son propre comportement.

Ce concept est complété par (Patruti 1998), qui introduit la notion de protocole d'interaction. Sa principale fonction est de trouver la structure permettant à des agents de respecter la spécification d'organisation, c'est-à-dire de projeter un ensemble de relations potentielles entre les composants d'un système. Cela donne alors corps à une structure de pilotage qui peut alors être traduite en une structure physique et en des actions exécutables par les équipements correspondants.

Pierre MASSOTTE (Massotte 1999) expose d'un point de vue plus philosophique sa vision de l'auto organisation en s'appuyant sur des analogies avec des systèmes auto organisés issues des Sciences de Vie. Ainsi, il défend le point de vue que l'auto organisation est indissociable des trois notions d'autonomie, qui est donnée à des entités dotées de règles de comportement simples, de rétroactions, qui peuvent être négatives et donc stabilisatrices ou positives et amplificatrices, et de non linéarités, qui introduisent des discontinuités et des ruptures de fonctionnements. Ce dernier aspect a du mal à être bien pris en compte par les outils classiques de l'Automatique.

Enfin, nous avons souligné, dans (Pujo & Ounnar 2001), le lien entre l'autonomie de chaque centre de décision et leur aptitude à l'auto organisation. Premièrement, nous devons considérer l'auto organisation comme un mode de prise de décision en temps réel sans organisation prévisionnelle préalable. En effet, s'il y avait une organisation prévisionnelle, par exemple un ordonnancement déjà établi, il n'y aurait plus besoin de s'auto organiser, mais simplement de s'adapter. Ceci implique un horizon temporel de prise de décision à très court terme, sans organisation prévisionnelle préalable, car les événements survenant à chaque instant peuvent entraîner des ruptures brutales de comportement. Certains travaux introduisent la notion de *real-time scheduling* (Iwamura *et al.* 2006a).

Ensuite, pour qu'il y ait organisation, il faut un objectif commun à ces centres de décision. Cela peut se décliner de différentes manières, selon les propriétés des machines et les caractéristiques des tâches que nous souhaitons organiser, et se traduit en termes de synchronisation, de coordination, de coopération, de négociation et/ou de génération de tâches, fonctions que nous avons précédemment évoquées et définies.

Enfin, la solution finalement adoptée pour faire fonctionner l'ensemble de ces constituants sera forcément obtenue par émergence. En effet, en l'absence de hiérarchie, chaque constituant participe d'une part à la proposition de solutions, et d'autre part à l'évaluation de solutions. La proposition apparaissant comme la plus performante du point de vue des critères d'évaluation sera adoptée.

L'émergence est un concept classique dans la théorie des systèmes, où elle désigne le principe selon lequel des propriétés globales d'un système ne peuvent pas être réduites aux propriétés des sous systèmes qui le composent. Il n'existe pas de théorie de l'émergence, au sens de l'Automatique ou de l'Informatique. Le concept d'émergence repose sur la constatation que dans un système composé de parties différentes, le tout est davantage que la somme des parties, et nous ne savons pas vraiment expliquer pourquoi. Cela dit, il ne faut pas confondre émergence issue d'une auto organisation et Théorie du Chaos.

L'émergence rapide de 'bonnes' solutions doit être favorisée par des règles *ad hoc* permettant de guider la recherche de ces solutions, et pour cela, l'auto organisation doit se faire dans un cadre structuré et structurant. Pour qu'il y ait effectivement émergence, il faut qu'il y ait une auto organisation qui soit organisée de manière formelle, voire même qui puisse donner des résultats de manière déterministe.

Il nous faut donc examiner quelles sont les formes que peut prendre la mise en œuvre de la prise de décision, ce que certains appellent la gouvernance d'un système.

• **Forme d'organisation de la Gouvernance**

La trentaine de mots qui ont comme suffixe 'archie', du grec "αρχή", commandement, sont tous relatifs au pouvoir ou à son exercice, c'est-à-dire à la manière d'exercer la prise de décision ou la gouvernance.

Nous pouvons classer ces mots en différentes catégories :

- exprimant la façon d'exercer le partage du pouvoir (c'est-à-dire le nombre de centres de décision) : dyarchie ou duarchie (gouvernance à 2), tétrarchie (gouvernement de 2 Césars et 2 Augustes à une époque de l'empire romain), pentarchie (gouvernement de cinq chefs)...
- exprimant une charge ou une responsabilité correspondant à l'exercice d'un pouvoir : ethnarchie (dignité d'ethnarque, qui est le gouverneur d'un territoire vassal sous l'empire romain), irénarchie (exerçant un pouvoir de police et d'enquête dans l'antiquité), phylarchie (fonction d'un phylarque, magistrat ou officier des tribus grecques antiques) navarchie (responsable d'une embarcation ou d'une flotte) ou encore triarchie (charge de triérarque),
- exprimant une zone géographique et le pouvoir associé : éparchie (circonscription territoriale), heptarchie (7 royaumes de Grande Bretagne), polémarchie (subdivision de l'empire éthiopien)
- exprimant le pouvoir véhiculé par une forme militaire : chiliarchie (division de la phalange grecque, composée de 1024 hommes), hipparchie (division de cavalerie grecque)...
- exprimant une institution au travers de laquelle s'exerce le pouvoir : patriarchie (juridiction religieuse), ou plus récemment énarchie (pouvoir et influence prêtés aux anciens élèves de l'ENA dans la haute fonction publique)
- ou exprimant la manière de légitimer la gouvernance et/ou de l'exercer : monarchie, synarchie, hiérarchie, oligarchie, polyarchie, panarchie, anarchie, hétérarchie, holarchie, apanarchie...

C'est cette dernière catégorie qui nous intéresse ici et que nous devons examiner, du moins pour les aspects 'prise de décision'. Le tableau présenté à la figure 41 donne de manière synthétique pour chacun des modes de gouvernance en question :

- la désignation du mode de gouvernance, ainsi que la classe à laquelle il appartient (au sens de (Trentesaux 2007)),
- une définition (du point de vue de la prise de décision),
- qui exerce la prise de décision,
- dans quel sens (quelle est l'orientation générale des décisions prises) et
- sur qui (qui exécute ou subit les décisions prises).

Désignation (Classe)	Définition	Prise de décision exercée par :	Au nom de ou dans l'intérêt de :	Sur :
Monarchie (Classe I)	Système dans lequel la décision est exercée par un seul centre de décision	UN centre de décision	lui même	les autres entités du système
Synarchie (Classe I)	Système monarchique où plusieurs centres de décision gouvernent simultanément divers sous systèmes	K centres de décision	eux-mêmes	les autres entités du système
Hierarchie (Classe I)	Système organisé autour d'une relation de subordination, chaque centre de décision dépendant du supérieur et commandant les inférieurs	UN centre de décision	d'intérêts supérieurs	les entités du sous système inférieur
Oligarchie (Classe I)	Système dans lequel la prise de décision est réservée à un sous groupe homogène de M entités (ex. : élite intellectuelle (aristocratie), minorité possédante (ploutocratie))	M entités organisées en UN ou K centres de décision	eux-mêmes, en général	les autres entités du système
Polyarchie (Classe I)	Système dans lequel la prise de décision est réservée à un sous groupe homogène de M entités	M entités organisées en UN ou K centres de décision	eux-mêmes, ou l'intérêt général du système	les autres entités du système
Panarchie (Classe II)	Système où coexistent différents modes de prise de décision, chaque entité du système global ne relevant que d'un seul mode de prise de décision (De Puydt 1860).	UN centre de décision parmi K fonctionnant en parallèle.	de ses propres intérêts, avec une vision système	les P entités concernées par ce centre de décision
Anarchie (hors classe)	Système caractérisé par une absence totale de prise de décision organisée, entraînant désordre et confusion du fait de l'absence de règles, ou de leur inobservation.	Personne ou chacune des entités	elle même	elle même
Hétérarchie (Classe III)	Système de prise de décision sans lien de subordination	chaque entité	l'intérêt général du système	elle même
Holarchie (Classe II)	Système hiérarchique composé de holons pouvant être eux même une holarchie (Koestler 1967)	chaque holon	lui-même, du point de vue tout et partie	la holarchie interne au holon
Apanarchie (Classe III)	Système où la prise de décision est totalement partagée entre toutes les entités du système (Rodriguez <i>et al.</i> 2007)	toutes les entités du système	toutes les entités du système	toutes les entités du système

Figure 41. Modes d'exercice de la gouvernance

Parmi tous ces modes de gouvernance, les modes les plus proches du concept de pilotage que nous souhaitons promouvoir sont sans aucun doute les modes hétérarchique, holarchique et apanarchique. Chacun d'entre eux nous pose toutefois des problèmes :

- une hétérarchie ne permet pas d'associer facilement aux prises de décision une décomposition hiérarchique structurelle du système,
- une holarchie laisse subsister éventuellement des mécanismes décisionnels de type hiérarchique,
- une apanarchie nécessite la participation de toutes les entités à l'élaboration de la solution de pilotage, ce qui est extrêmement pénalisant et surtout inutile.

Pour ces différentes raisons, nous proposons le concept d'Isoarchie.

- **Définition de l'Isoarchie**

En fait, le système de pilotage que nous souhaitons dépasse la simple notion de décentralisation, qui ne concerne que des entités de type 'ressource', prises à un niveau unique de décision, et généralement assez statique.

Il doit répondre aux impératifs suivants :

- relever du paradigme holonique tout en réfutant toute subordination : les entités en cause dans l'élaboration de la prise de décision sont des holons de différents types, qui conservent toutes les propriétés d'agrégation et de spécialisation, avec les caractéristiques de composition et de décomposition hiérarchiques qui y sont attachées, mais ils ne possèdent pas de capacité de prise de décision hiérarchique : aucun centre de décision ne peut décider en lieu et place d'un autre holon ou d'une holarchie de niveau inférieur,
- avoir une auto organisation totalement maîtrisée : le caractère évolutif des entités holoniques présentes impose un fonctionnement en auto organisation, selon des schémas d'évolution de cette organisation, avec un contrôle de cohérence obligatoire, réalisé localement au sein de chaque holon et à chaque niveau de décomposition structurelle (ou organique), pour lequel le mécanisme de décision doit assurer l'autonomie décisionnelle,
- présenter une orientation 'métier' de la prise de décision : les règles qui permettent la prise de décision doivent intégrer aux approches temporelles des approches liées à la technologie ou, d'une manière plus générale, au 'métier' associé à la prise de décision ; ceci permet des décisions beaucoup plus précises, capables d'être prises en temps réel en fonction de l'état réel et des capacités techniques de ces entités.

Bref, l'idée générale est que seules les entités concernées par une décision à un niveau donnée puissent contribuer de manière égalitaire à l'élaboration de cette décision, et qu'elles le fassent avec un maximum d'expertise et de connaissances sur leur état.

Nous proposons d'appeler ce mode de gouvernance : isoarchie.

La composition du terme « isoarchie » provient de l'association des deux radicaux grecs : le préfixe *iso* (égal) et le suffixe *archie* (commandement).

Nous en proposons la définition suivante :

Isoarchie : Système hétérarchique composé de holons pouvant être eux même une isoarchie.

Ainsi, à un même niveau de prise de décision, tous les différents centres de prise de décision ont exactement la même autorité dans le mécanisme de prise de décision : cela correspond donc à l'absence totale de hiérarchie, tant sur le plan fonctionnel que temporel.

Dans un système de décision composé de plusieurs centres de prise de décision, une architecture décisionnelle peut être décrite comme isoarchique lorsque chaque centre de décision est doté de la même capacité de décision.

Cette propriété peut être facilement obtenue lorsque les mécanismes de décision sont dupliqués sur chaque centre de décision et sont seulement paramétrés en fonction des caractéristiques de chacun.

L'isoarchie apparaît alors comme une spécification particulière de la notion d'hétérarchie, préservant une compatibilité avec le paradigme holonique, et comme l'opposé absolu de la notion de hiérarchie.

Au sens de (Trentesaux, 2007), l'isoarchie peut être classée dans la catégorie 'décentralisé de type III' et ne doit tolérer aucune nuance.

2.3. Modélisation d'un Système de Pilotage Isoarchique

- **Structuration d'un holon, notions de I_holon et de M_holon**

Nous définissons un Holon comme une entité conceptuelle reposant sur l'association d'une part d'une Structure Matérielle et d'autre part d'un Système d'Information associé à un système de traitement le dotant d'une Intelligence Décisionnelle lui permettant de fonctionner en interaction avec d'autres holons (figure 42). Nous appelons M_holon (M pour Matériel) la structure matérielle du holon.

Nous appelons I_holon (I pour Information ou pour Intelligence) le système informationnel et décisionnel du holon.

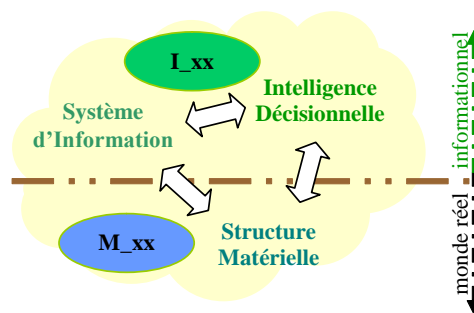


Figure 42. Structure basique d'un holon XX

Cette structuration permet une décomposition récursive des systèmes de production, en accord avec le paradigme holonique, en faisant clairement apparaître la dualité et le parallélisme entre monde réel (matériel) et informationnel (immatériel, où se situent données et prises de décision).

- **Récursivité et effet Janus**

La figure 43 montre au travers d'un modèle UML comment se construit la récursivité des holons.

Le I_holon traite dans tous les cas les problèmes décisionnels du holon au sein de son environnement : il participe au mécanisme de décision de l'isoarchie à laquelle appartient le holon et représente le holon au sein de son environnement.

Par ailleurs, si nous sommes dans le cas d'un holon élémentaire, le M_holon est la matérialisation inerte du holon. Les caractéristiques majeures du M_holon seront des attributs partagés avec le I_holon, qui assure le contrôle-commande du holon.

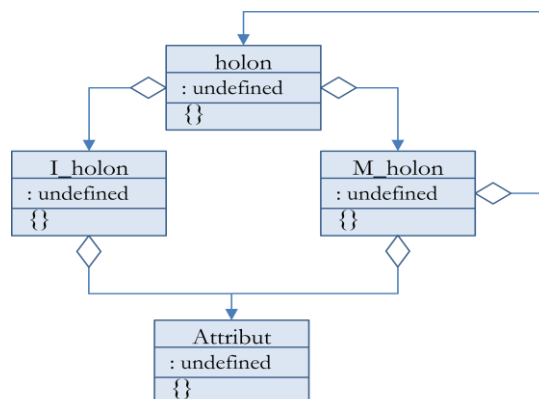


Figure 43. Modèle UML de composition d'un holon

Lorsque le holon est qualifié de complexe, le M_holon est la matérialisation du contenu composé du holon : il est donc composé d'autres holons, qui peuvent avoir un comportement dynamique actif au sein de leur propre isoarchie. Les caractéristiques majeures du M_holon seront des attributs partagés avec le I_holon , mais le contrôle-commande ou le pilotage des holons le constituant relèvent justement de ces holons, qui forment alors une isoarchie interne au holon.

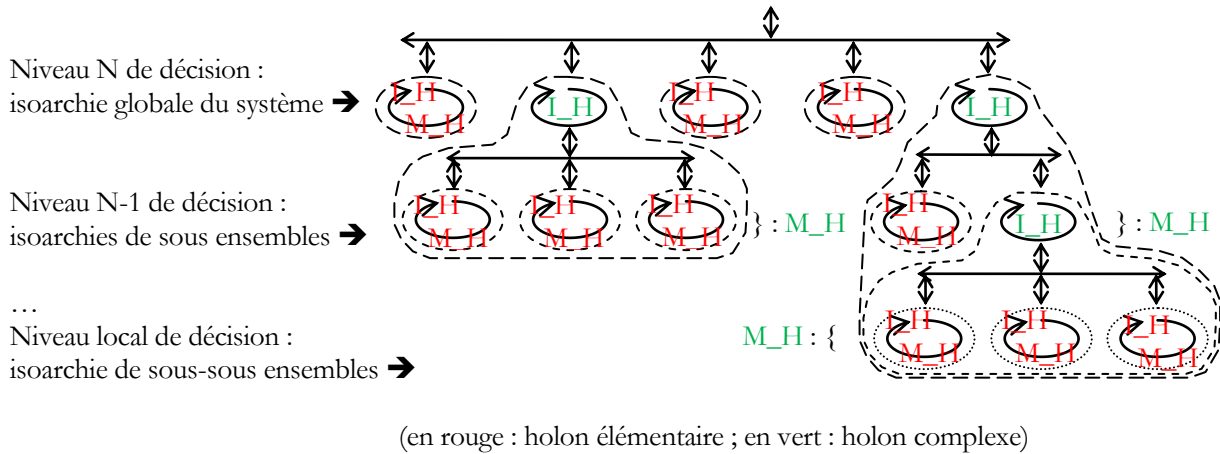


Figure 44. Structure basique d'un holon complexe

Des exemples concrets seront donnés au prochain paragraphe.

Dans ce contexte, nous pouvons donner le modèle formel d'un holon.

• Modèle formel d'un Holon

Un holon situé à un niveau N de décision peut être représenté par le quadruplet suivant :

$$H_N = \langle I_{H_N}, (M_{H_N} \vee \{H_{N-1}\}), \{[X_N]\}, T_{H_N} \rangle$$

où :

I_{H_N} : est la partie informative et décisionnelle du holon,

$(M_{H_N} \vee \{H_{N-1}\})$: est la partie matérielle du holon, qui peut être selon les cas :

M_{H_N} : une partie matérielle élémentaire,

$\{H_{N-1}\}$: une partie matérielle composée de plusieurs holons, c'est-à-dire une isoarchie,

$\{[X_N]\}$: l'ensemble des holarchies $[H_N]_i$ et/ou des isoarchies $[I_N]_i$ auxquelles appartient le holon,

T_{H_N} : le type de holon.

Cette définition appelle quelques précisions.

I_{H_N} est en fait la partie du holon qui est tournée vers le système (le holon) de niveau supérieur. Comme nous sommes placés dans la perspective d'un comportement isoarchique du holon vis-à-vis du système auquel il appartient, I_{H_N} est un des composants décisionnels de l'isoarchie $[I_{N+1}]$.

Par ailleurs, si H_N est un holon composé d'une isoarchie $[I_N]$ de holons $\{H_{N-1}\}$, ce sont les $I_{H_{N-1}}$ qui vont organiser le fonctionnement interne du holon H_N , car ce sont les composants décisionnels de l'isoarchie $[I_N]$. I_{H_N} et les $I_{H_{N-1}}$ fonctionnent exactement de la même manière, car ils relèvent du même modèle.

Dans l'isoarchie $[I_N]$, I_{H_N} ne participe pas directement au mécanisme de décision relatif à $[I_N]$, il se contente de l'alimenter en objectifs à atteindre. Ces objectifs ont été négociés par I_{H_N} dans l'isoarchie $[I_{N+1}]$, en fonction de la capacité réelle du holon H_N , observée par I_{H_N} en fonction de l'activité des $I_{H_{N-1}}$ de l'isoarchie $[I_N]$.

Il se peut toutefois qu'ultérieurement, en fonction des réorganisations et restructurations liés à la dynamique de l'évolution du système (et à son auto organisation), ces différents I_{H_N} se retrouvent en interaction dans une même isoarchie. Dans tous les cas, le I_{H_N} est composé d'une partie 'données' (données d'identification, données d'état, données de traçabilité...) et d'une partie 'traitements' (gestion des données, intelligence décisionnelle, ...). La figure 45 donne un modèle de cette association en accord avec la figure 42.

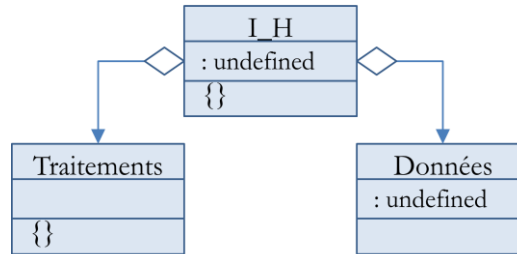


Figure 45. Structure basique d'un I_{holon}

Si H_N est un holon élémentaire, le I_{H_N} prend les décisions qui mettent en œuvre le M_{H_N} . Pour qu'il n'y ait pas d'ambiguïtés, il faut que les deux parties du holon H_N soient liées de manière inconditionnelle. Pour cela, parmi les attributs que partagent le I_{H_N} et le M_{H_N} , nous aurons obligatoirement un numéro d'identification. Ce numéro sera inscrit en 'dur' sur le M_{H_N} et sera stocké comme une donnée statique par le I_{H_N} . Sachant que lors du déplacement d'un holon élémentaire dans le système de production, le flux holonique sera en réalité décomposé en un flux matériel, coté M_{H_N} , et en un flux immatériel coté I_{H_N} . Le partage d'un attribut d'identification permet de synchroniser chaque holon.

Par ailleurs, un holon H_N peut être actif dans plusieurs isoarchie et/ou holarchies (rappelons que les isoarchie sont relatives aux aspects décisionnels, et que les holarchies sont restreintes aux aspects structurels). Dans ce cas, si nous notons $[H_N]_i$ une de ces holarchies et $[I_N]_i$ une de ces isoarchies, leur ensemble sera noté $\{[X_N]_i\}$. La connaissance de cet ensemble permet de connaître de manière formelle les mécanismes comportementaux dans lesquels interagit le holon H_N . Il appartient à chaque holon de vérifier que toute nouvelle décision est cohérente, c'est-à-dire qu'elle respecte le principe de causalité (une décision ne doit pas aller à l'encontre d'une décision précédente qui n'aurait pas été invalidée).

Selon le type T_{H_N} du holon H_N , il est possible d'implanter dans le I_{H_N} du holon H_N des informations et des comportements standards prédéfinis, relevant chacun des spécificités du type T_{H_N} .

Dans ce cas, nous nommerons isoarchie 'apanarchique' l'isoarchie $[I_N]_a$ contenant tous les holons H_N d'un même niveau de décision $N+1$ et relevant de différents types T_H (figure 46), c'est-à-dire l'isoarchie de cardinalité maximale.

Par ailleurs, nous nommerons 'isoarchie *ad hoc*' l'isoarchie minimale $[I_N]_m$ contenant tous les holons d'un même niveau de décision permettant de résoudre un problème spécifique donné.

Soit a , le nombre de holons H_N situés dans l'isoarchie apanarchique $[I_N]_a$. Nous avons :

$$\begin{aligned} \text{Card}([I_N]_a) &= a \\ \text{Card}([I_N]_m) &= m \leq a \end{aligned}$$

Soit une isoarchie partielle $[I_N]_k$ de cardinalité $\text{Card}([I_N]_k) = k$, avec $m \leq k \leq a$.

$$\text{Si } \forall i \leq k, \text{ si } H_{Ni} \in [I_N]_m \text{ alors } H_{Ni} \in [I_N]_k$$

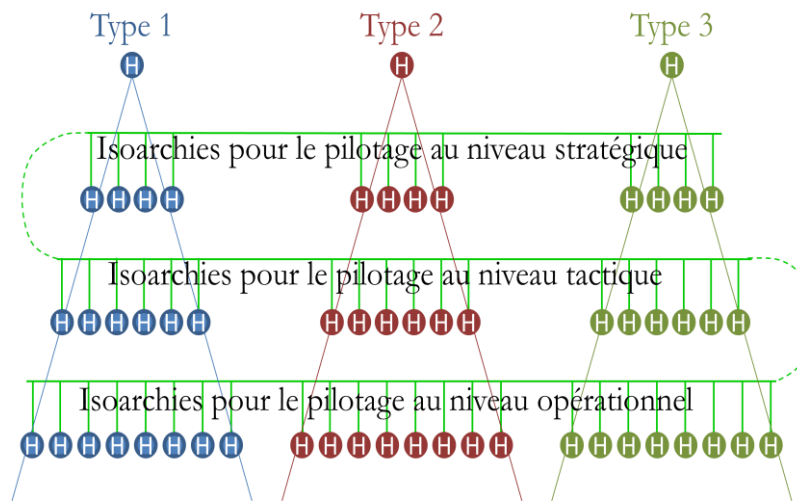


Figure 46. Pilotage isoarchique à différents niveaux de décision

Ceci signifie :

- qu'il y a $(k-m)$ holons qui n'ont pas d'influence dans l'élaboration de la prise de décision face à un problème spécifique donné,
- que tous les holons de l'isoarchie minimale $[I_N]_m$ nécessaire et suffisante pour résoudre ce problème spécifique donné sont des éléments de toute autre isoarchie $[I_N]_k$ apte à résoudre ce problème,
- toute isoarchie $[I_N]_k$ ne contenant pas tous les holons de l'isoarchie minimale $[I_N]_m$ ne peut pas fournir une bonne solution au problème spécifique donné.

Cet ensemble de propriétés peut conduire à différentes stratégies dans le choix du mécanisme de prise de décision. Par exemple, une stratégie consiste à déterminer des isoarchies spécialisées, de cardinalité minimale, et donnant très rapidement une bonne solution.

Une autre approche consiste à privilégier des isoarchies le plus polyvalentes possibles, capable de résoudre une large variété de problèmes.

Une bonne approche consiste à ne pas multiplier inconsidérément le nombre d'isoarchies fonctionnant en parallèle et d'utiliser des mécanismes de décision assurant d'un délai borné d'obtention d'un résultat.

• Mode de décision au sein d'une isoarchie

Une isoarchie positionnée à un niveau N de décision étant autonome dans son mécanisme de prise de décision, cela impose certaines caractéristiques aux décisions qui peuvent y être prises. Cela se traduit par les règles suivantes :

- toute décision prise au sein d'une isoarchie ne concerne que la holarchie correspondante, c'est-à-dire tout ou partie des différents holons qui composent l'isoarchie,
- toute prise de décision ne peut se faire que sur la base des informations contenues dans les holons H_N de l'isoarchie $[I_N]$, sachant que ces holons font parties d'holarchies fonctionnelles et structurelles $[H_N]$ et sont donc porteurs d'informations plus globales que celles relatives au niveau de décision N ,
- dans tous les cas, une décision doit être prise : le système décisionnel ne peut pas rester bloqué par une absence de décision ou par l'impossibilité de faire des arbitrages – comme le dit l'adage populaire, 'mieux vaut une mauvaise solution que pas de solution du tout',
- la prise de décision dans une isoarchie peut être qualifiée d'émergente car elle n'émane pas d'une entité de niveau hiérarchique supérieur, mais elle émane directement des entités parties prenantes – ceci reste valable quelle que soit la manière de prendre cette décision.

Cette émergence peut prendre plusieurs formes, que nous pouvons regrouper en deux grandes classes :

- l'émergence par l'interaction directe entre les entités H_N de l'isoarchie $[I_N]$,
- l'émergence par la recherche d'un bon compromis entre les entités H_N de l'isoarchie $[I_N]$.

Ceci exclue volontairement toute décision prise unilatéralement par une seule des entités sans prise en considération des intérêts des autres entités ou dans le cadre d'une isoarchie ne couvrant pas suffisamment le problème – c'est-à-dire n'étant pas au minimum une isoarchie *ad hoc*.

L'émergence par interaction est réalisée de manière classique au travers d'un protocole d'interaction auquel participent les holons H_N de l'isoarchie $[I_N]$.

Tout type de protocole d'interaction est *a priori* compatible avec le fonctionnement d'une isoarchie $[I_N]$.

L'émergence par la recherche d'un bon compromis passe par la proposition d'une solution à un problème donné de pilotage, soit à l'aide d'une méthode d'analyse, soit grâce à une méthode d'aide à la décision.

Cette méthode doit :

- être déclenchée par l'un des holons H_N de l'isoarchie $[I_N]$,
- prendre les données qu'elle utilise dans les structures de données des holons H_N de l'isoarchie $[I_N]$,
- prendre en considération les intérêts et points de vue des différents holons H_N de l'isoarchie $[I_N]$,
- nécessiter une validation de la solution proposée par l'ensemble des holons H_N de l'isoarchie $[I_N]$, avant sa mise en œuvre.

Certaines de ces contraintes imposent de fait l'utilisation d'une méthode d'aide à la décision multicritère pour obtenir une solution qui soit effectivement un bon compromis, c'est-à-dire la moins mauvaise des solutions de pilotage.

2.4. Proposition d'une architecture isoarchique : PROSIS

Nous avons vu lors du panorama des travaux effectués par la communauté HMS qu'un consensus semblait largement se dessiner autour du choix de trois types de holons permettant de définir le produit cartésien $\{\text{QUOI}\} \times \{\text{OU}\} \times \{\text{QUAND}\}$. Ceci se retrouve dans l'architecture de référence PROSA, qui utilise comme holons de base les Holons Produit, Ressource et Ordre. Nous avons vu que d'autres propositions, utilisant d'autres terminologies, sont équivalentes à cette approche. Nous proposons donc, dans l'optique d'une architecture de pilotage de type isoarchique, d'être en accord avec ce consensus. Cela ne signifie pas que les propriétés (données et comportements) associées à ces holons sont identiques à celles spécifiées dans PROSA.

Par ailleurs, la notion de Holon Staff de PROSA n'est plus d'aucune utilité dans une approche isoarchique. Par contre, une critique souvent faite à ce type d'approche hétérarchique, par rapport à des approches prévisionnelles, est leur manque de visibilité vis-à-vis de leur futur proche : il est difficile de savoir ce qui va se passer. Pour pallier à ce problème, nous proposons d'inclure dans l'approche isoarchique une composante de reconstruction par simulation de l'avenir proche. Ceci sera implémenté par l'ajout de capacité de simulation sur chacun des holons de base, ainsi que de l'ajout d'un Holon Simulation qui, à partir des informations qu'il inter-échangera avec les autres holons, sera capable de proposer une vue prévisionnelle très fortement probable du comportement du système de production.

Nous appelons cette approche PROSIS, pour 'Product, Resource, Order & Simulation Isoarchic System

Nous nous focaliserons dans un premier temps sur les holons de base.

• Les Holons de base dans PROSIS

Ces holons peuvent apparaître et disparaître durant le fonctionnement. C'est évident pour les Holons Produit et les Holons Ordre, qui sont introduits dans le système pour y être traités, puis qui le quittent. Cela est également vrai pour les Holons Ressource : de nouvelles ressources peuvent être introduites dans le système, d'autres peuvent être retirées, d'autres peuvent être indisponibles temporairement, disparaissant un certain temps et réapparaissant ultérieurement (cas d'une panne ou d'une maintenance programmée par exemple).

Par ailleurs, un holon peut être ou non mobile. C'est généralement les cas de tous les Holons Produit et Ordre. Par contre, un Holon Ressource peut être mobile (cas d'une ressource robotisée de transport assurant des tâches flexibles de transitique), mais la plupart des Holons Ressource ont une localisation statique avérée de leur *M_ressource*, dépendant de l'implantation de l'atelier.

Nous nous intéresserons dans un premier temps à des Holons Ressource immobiles.

La figure 47 propose un diagramme de classe UML pour la représentation des trois types de holons.

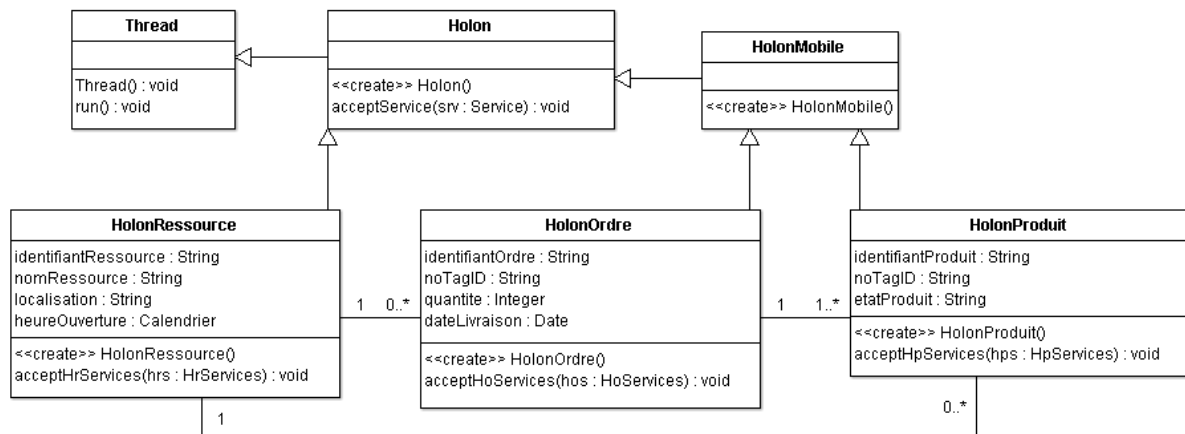


Figure 47 : Diagramme de classe UML des holons

Une représentation identique pourrait être faite concernant les *I_Holons*.

Nous remarquons que tous les holons héritent de la classe « Thread » (processus léger) : ainsi, les holons disposent d'un processus qui assure le traitement de données et l'organisation des prises de décision : chaque holon a alors sa propre existence, et peut donc assurer son autonomie.

• Le Holon Produit

Un Holon Produit (HP) est relatif aux objets à produire. Chaque HP est constitué d'un *I_produit* (l'objet physique lui même) et d'un *I_produit* qui contient une partie données, relative à ses données d'identification, à son processus de traitement (principalement de fabrication, mais aussi de transformation, d'assemblage...), à son modèle d'état et à toutes les informations concernant sa traçabilité (en d'autres termes et respectivement son futur, son présent et son passé (Pannequin et Thomas 2006)), et une partie 'traitements' contenant des méthodes de gestion des données, de prise de décision...

Il existe donc autant d'instances de HP que de produits fabriqués ou en cours de fabrication. Ceci est une différence majeure avec PROSA. Cette identification à l'unité passe par le déploiement des technologies infotroniques *ad hoc* reliant chaque *M_produit* à son *I_produit*. Un bon exemple de ces technologies est le RFID, avec un tag ID attaché au *M_produit* et contenant les informations clefs du *I_produit*. Le stockage dans le *I_produit* du numéro d'identification 'TagID' du tag ID fixé sur le *M_produit* suffit pour pouvoir assurer avec une excellente fiabilité la cohérence du Holon Produit, en particulier pour assurer la cohérence entre les flux physiques et les flux informationnels lors du transfert d'une pièce dans l'atelier. Cette condition est la condition minimale pour assurer la cohérence du système holonique. Le numéro d'identification 'TagID' est un attribut partagé entre le *I_produit* et le *M_produit* du HP en question. Le tag ID peut également supporter des fonctions secondaires de traçabilité, qui viennent en redondance des informations stockées dans le *I_produit*.

La figure 48 propose un diagramme de classe UML représentant l'organisation des données au sein d'un Holon Produit.

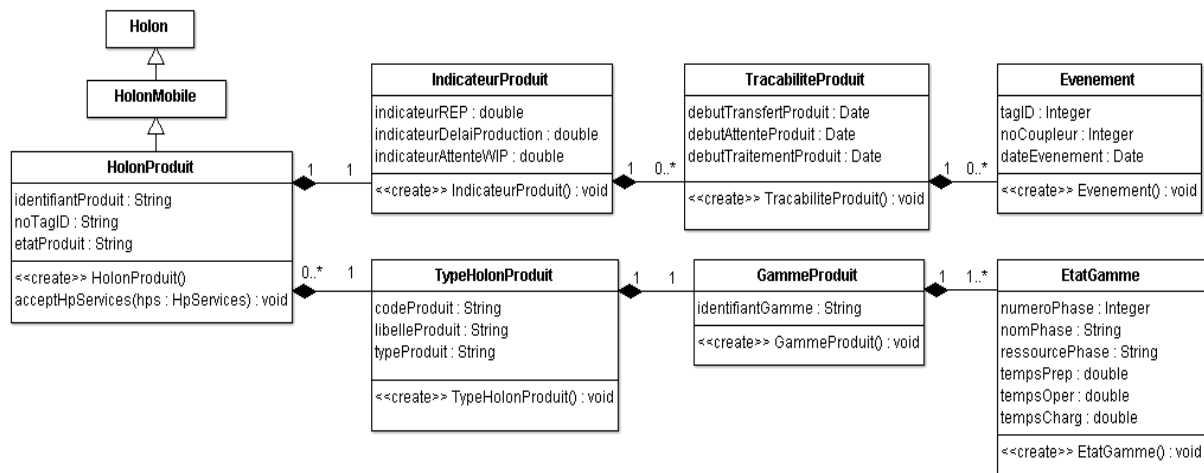


Figure 48 : Organisation des données dans le diagramme de classe du Holon Produit

Le champ 'TypeProduit' permet de donner des caractéristiques récurrentes à tous les produits d'un même type. Ainsi, chaque produit circulant dans l'atelier sera une instance particulière de la classe décrivant de manière générique le produit : 'Type Holon Produit'. Cette classe peut également contenir des éléments de description physique du produit, tels que la matière, la géométrie (c'est-à-dire l'état physique initial, l'état physique final...) que nous ne détaillons pas ici.

La ressource nécessaire à l'accomplissement d'une tâche correspondant à un état donné de la gamme est défini par le champ 'RessourcePhase', et peut être renseignée soit directement par le nom, le code ou l'identifiant de la dite ressource (auquel cas il n'y en a qu'une seule de possible ou bien elle a été choisie à l'avance), soit indirectement par le type de ressource nécessaire (la ressource réalisant la tâche sera alors affectée en ligne, après un choix parmi toutes les ressources du type considéré).

Les données attachées à chaque produit comportent également les valeurs d'indicateurs de performance propres à chaque produit, tels que son délai de production ('IndicateurDelaiProduction', égal à la date d'achèvement de la dernière phase de la gamme moins la date d'introduction du produit à l'état initial dans le système de production), son temps cumulé d'attente dans les encours ('IndicateurAttenteProduit' = $\sum [\text{'DébutTraitementProduit'} - \text{'DébutAttenteProduit'}]$) ou encore son REP ('IndicateurREP' = temps effectif cumulé de traitement / temps passé dans le système). Ces indicateurs sont calculés en temps réel à partir des données de traçabilité (dates d'arrivée du I_produit et du M_produit, dates de début de traitement, de fin de traitement, de sortie...) qui sont en fait autant d'événements observables via un suivi automatique du TagID du produit.

• Le Holon Ressource

Le Holon Ressource (HR) est relatif aux équipements de production. Un HR reste conceptuellement similaire à la définition correspondante de PROSA. La M_ressource correspond à un équipement automatisé standard actuel : MOCN, robot industriel... ou à un poste manuel connecté à une interface homme/machine pour la conduite des opérations. Bien entendu, les méthodes d'allocation des ressources de la I_ressource évoluent, puisque les interactions avec les autres types de holons sont différentes dans notre contexte isoarchique.

Un holon ressource doit gérer complètement le fonctionnement d'une ressource, en particulier la gestion des modes de marche et de ses états. La structure de données associée est montrée à la figure 49.

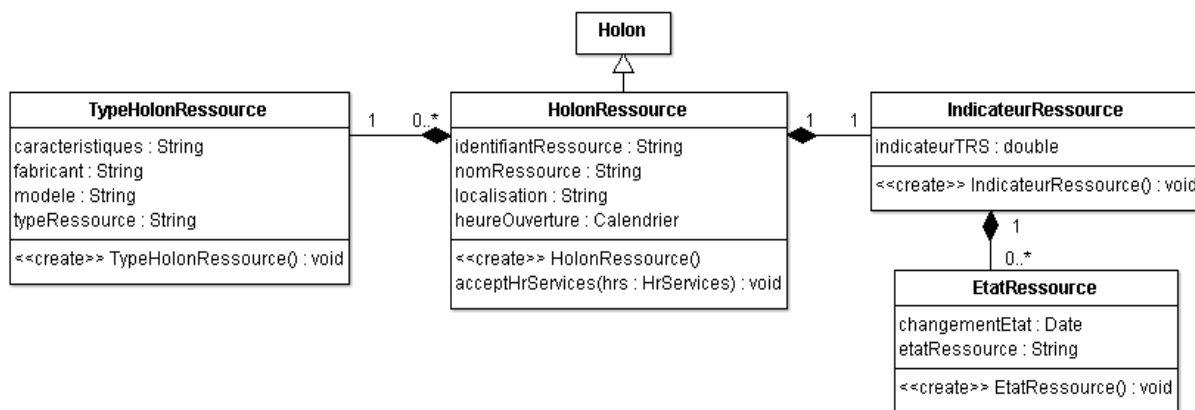


Figure 49 : Organisation des données dans le diagramme de classe du Holon Ressource

Les propriétés d'héritage par spécialisation permettent de préciser les caractéristiques techniques des ressources.

Les autres aspects relatifs à un HR concernent les fonctions de gestion de l'état interne de la ressource (marche, arrêt, pause, panne, attente, ...), les fonctions de traçabilité (archivage du journal de la ressource) et les fonctions d'évaluation de performances (calcul du cumul des différents types de temps (attente, préparation, production...), calcul d'indicateurs ('IndicateurTRS' = Temps d'activité / Temps d'ouverture) et suivi graphique de l'historique de ces indicateurs).

• Le Holon Ordre

Un Holon Ordre (HO) représente une tâche dans le système de production : un ordre de fabrication concernant généralement un ensemble de HP. Il est donc intimement lié aux notions de lot, d'encours et de délais. Le I_ordre veille lors de l'exécution du travail au respect des dates ainsi qu'à la prise en compte de facteurs économiques (taille du lot, volume de l'encours, minimisation des changements de production, fractionnement d'un lot...). Le M_ordre sera selon les cas l'OF papier, muni d'un tag ID, ou le conteneur, également tagué, qui permet la manipulation des M_produits. Les synchronisations entre I_ordre et M_ordre s'effectuent de la même manière que pour un Holon Produit, le TagID étant un attribut partagé.

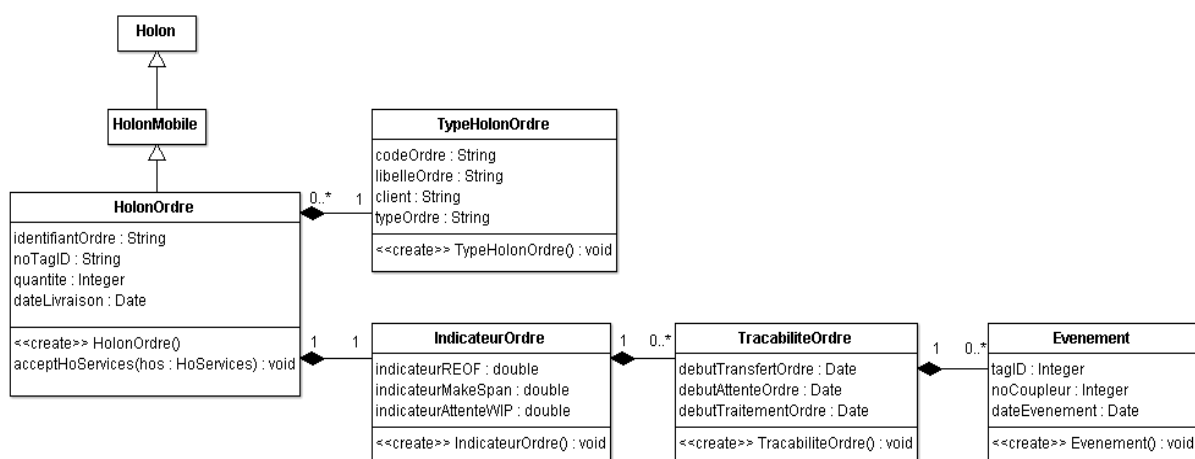


Figure 50 : Organisation des données dans le diagramme de classe du Holon Ordre

Les différents types d'ordre sont les ordres de fabrication (OF), qui s'adressent aux activités de fabrication, mais aussi d'assemblage, et les ordres d'approvisionnement (OA), qui concernent les lancements d'achats et

les commandes en sous traitance...

Un certain nombre de données sont renseignées grâce aux possibilités d'héritage de propriétés venant de Holons Ordres parents (niveau supérieur de la nomenclature) ou vers des Holons Ordre fils (niveau inférieur de la nomenclature). Ceci permet de calculer la date d'achèvement de chaque tâche. Un exemple de ce type de calcul entre Holons Ordre, directement inspiré d'un calcul de besoins, est détaillé par Pascal BLANC dans (Blanc 2006).

Par ailleurs, différents indicateurs de performance propres à chaque ordre sont également gérés et calculés en interne. Il s'agit du Ratio d'Efficacité d'un Ordre de Fabrication (temps effectif cumulé de traitement sur l'ensemble des produits du lot concerné par le HO / date d'achèvement de la dernière phase de la gamme de la dernière pièce du lot moins la date d'introduction du lot de produits à l'état initial dans le système de production), du MakeSpan, ou encore de la somme cumulée des temps d'attente dans les encours. Ces indicateurs sont élaborés en temps réel à partir des données de traçabilité des Holons Produit relevant du Holon Ordre.

- **Le Holon Simulation**

Une autre différence majeure entre PROSIS et PROSA est la disparition du concept d'Holon Staff, qui n'a plus aucune raison d'être dans un contexte isoarchique. Nous introduisons le concept d'Holon Simulation, qui a un objectif totalement différent : il s'agit, à partir de l'état réel du système de production, obtenu par l'écoute et l'analyse des interactions entre tous les autres holons, de simuler l'évolution du système de production et d'anticiper d'éventuels dysfonctionnements. Ce type de holon ne contribue pas à l'auto-organisation mais facilite le rôle du personnel en charge de l'atelier : il confère au pilotage des propriétés proactives (Pujo *et al.* 2004) que nous ne développerons pas ici, mais qui peuvent être mises en œuvre au travers de différentes architectures de simulation distribuée. Nous reviendrons sur ce holon dans la partie perspective de ce mémoire.

2.5. Le soutien aux holons : l'EPA (Entité de Pilotage Ambiant)

- **Interactions entre les holons HP, HR et HO**

L'auto-organisation dans un tel ensemble de holons sous entend que les décisions de pilotage doivent être prises localement. PROSIS reflète naturellement l'organisation physique des entités : autour de chaque ressource se retrouvent physiquement *une* M_ressource, *p* M_produits et *k* M_ordres. Ces derniers concernent les *p* produits correspondants ($k \leq p$). Si chacun des *k* HO concerne q_i produits, alors $p = \sum_{i=1}^k q_i$. La prise de décision auto-organisée dans le pilotage exige la participation de toutes les entités impliquées : ressource, ordres et produits. Pour cela, des interactions locales et spécifiques seront établies entre les I_holons des $(1+p+k)$ holons concernés : *une* I_ressource, *p* I_produits et *k* I_ordres. Ces I_holons constituent une 'Flat Holonic Form' locale, où les liens directs entre holons, représentatifs des interactions, sont représentées à la figure 51 par un graphe.

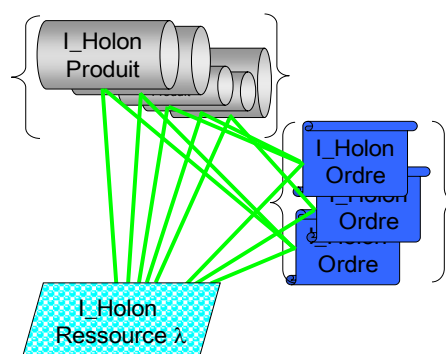


Figure 51 : Graphe d'interactions locales entre holons autour d'une ressource

Ce graphe est dynamique, dans la mesure où les Holons Produit et les Holons Ordre sont des holons mobiles qui circulent dans le système de production : localement, ils vont arriver (pour être traités par la ressource) puis ils vont repartir (une fois le traitement effectué). Il représente l'état instantané d'un pôle local de prise de décision isoarchique.

Si nous ôtons de ce graphe le Holon Ressource, seul holon non mobile du pôle, les holons restants (HP & HO) constituent l'encours 'au pied de la ressource' (que nous appellerons par la suite le *WIP*, pour *Work In Progress*).

Par ailleurs, il apparaît clairement que les holons constituant ce pôle n'ont pas tous le même objectif : un compromis doit être trouvé en fonction d'une part des objectifs généraux de production et d'autre part, de l'état réel et des objectifs propres de chacun des holons du pôle, dans l'optique de faire émerger une bonne solution de pilotage. En termes de traitements possibles, c'est-à-dire pouvant être mis en œuvre par les I_holons, il est clair que tous les holons d'un même type doivent supporter les mêmes traitements, standards pour un type donné, et seulement paramétré par l'état propre du holon considéré et par l'état de son environnement.

Les traitements effectués par les holons appartenant à un ensemble de traitements totalement prédéfinis, il nous est apparu inutile de faire circuler l'intégralité du contenu des I_holons mobiles, mais seulement leurs données.

Pour cela, nous proposons de nous appuyer sur quelques idées issues de l'informatique ambiante.

- **Soutien aux holons HP, HR et HO : notion de pilotage ambiant et de services**

Un I_holon mobile réduit uniquement à sa structure de données n'est pas en capacité d'exercer son autonomie : il lui faut un système de traitement de l'information qui lui permette d'interagir avec d'autres holons et de prendre des décisions.

Ceci peut être facilement réalisé par la mise à disposition des holons du pôle local de décision d'un ensemble de services ambiants de traitement (figure 52).

Nous appellerons le système informatique, localisé auprès de chaque ressource et fournissant aux I_holons différents services *ad hoc* une Entité de Pilotage Ambiant (EPA).

Le pilotage des entités holoniques du système de production peut être qualifié d'Ambiant du fait de l'omniprésence de systèmes informatiques non apparents, communicants avec ou sans fil et leur conférant une capacité décisionnelle d'auto-organisation.

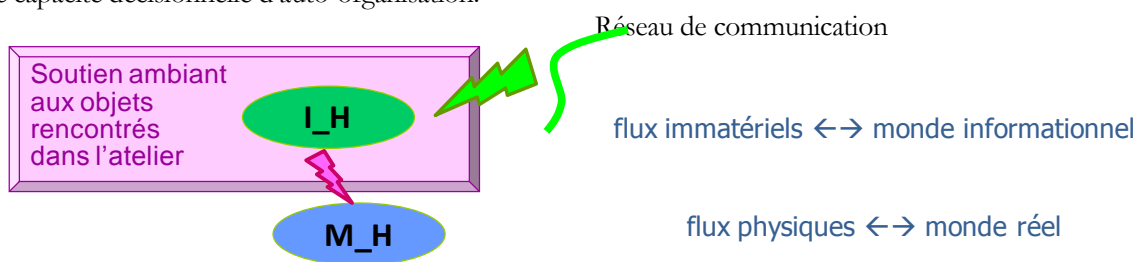


Figure 52 : Services ambiants apportés aux holons

La figure 53 présente sous la forme d'un diagramme de collaboration comment se déroule l'invocation d'un service par un Holon.

Tous les services ambiants proposés fonctionnent suivant ce principe générique et sont mis en œuvre à l'initiative du holon.

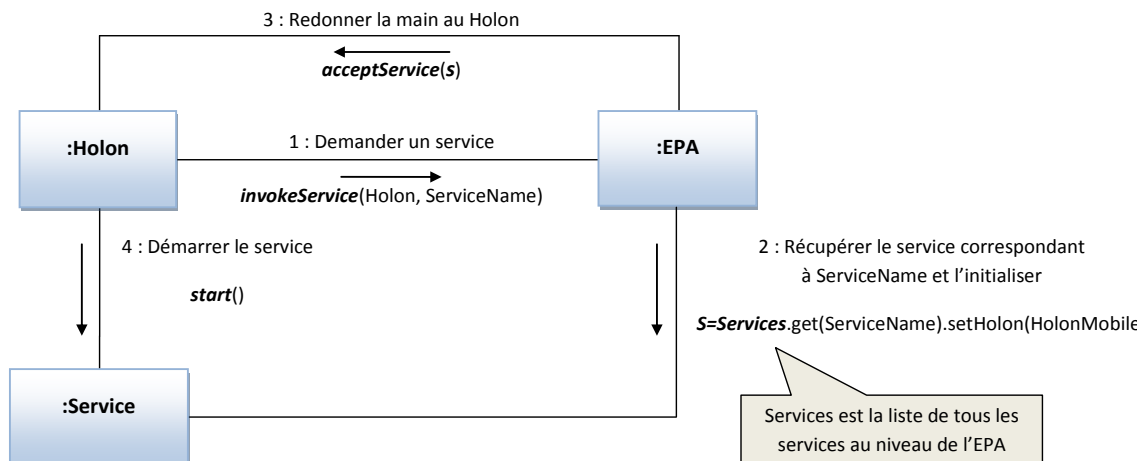


Figure 53 : Diagramme de Collaboration illustrant l'invocation d'un service par un Holon

Seul, le service permettant la création du processus d'autogestion d'un holon mobile est déclenché automatiquement lors de l'évènement de synchronisation RF entre le I_holon et le M_holon.

La figure 54 illustre les différentes classes de services ambiants *ad hoc* proposés par l'EPA aux holons :

- Accueil des données d'état du holon (structure de données du I_holon),
- Processus de gestion du holon (suivi en temps réel des changements d'état du holon et mise en œuvre des services *ad hoc* à chaque situation),
- Aide à l'opérateur (interface de visualisation de l'EPA et de ses hôtes),
- Synchronisation des I_Holons et des M_Holons, *via* les technologies infotroniques,
- Aide à l'élaboration des solutions de pilotage...

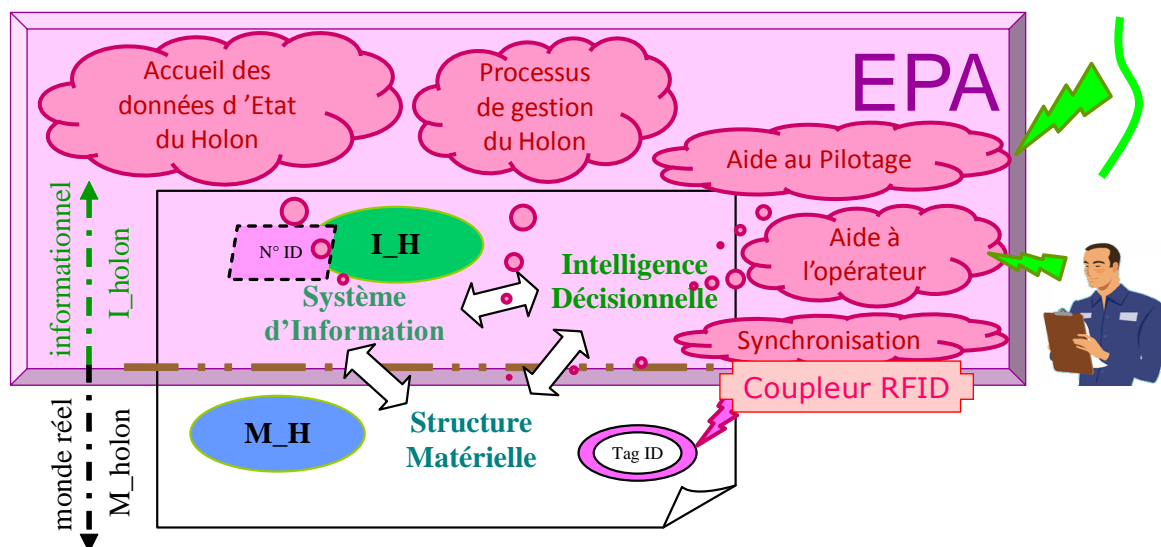


Figure 54 : Types de services ambiants fournis à un holon par une EPA

Le tableau présenté à la figure 55 traite de la mise en œuvre de ces services par les différents types de holons.

Services	Holon Ressource	Holon Ordre	Holon Produit
Accueil des données	Hébergement permanent	Accueil temporaire dans le WIP	Accueil temporaire dans le WIP
Processus de gestion (threads)	Processus permanent : il ne faut toutefois pas le confondre avec le processus de gestion interne de l'EPA qui existe aussi	Processus créé pour chaque HO : il débute à l'arrivée du 1er HP et se termine lors du départ du dernier HP présent dans le WIP	Processus spécifique à chaque HP : il débute lors de l'arrivée du HP dans le WIP et finit lors du transfert vers le WIP suivant
Aide au pilotage	Oui, pour le choix du HP suivant à traiter	Oui, pour la gestion du chevauchement	Oui, pour déterminer le prochain HR
Aide à l'opérateur	Visualisation sur l'IHM (à gauche, figure 100)	Visualisation sur l'IHM (dans le WIP, figure 100)	Visualisation sur l'IHM (dans le WIP, figure 100)
Synchronisation I_H/M_H	Non	Oui, via RFID	Oui, via RFID
Communication	Oui, lors des transferts directs de holons : envoi du I_H	Oui, pour la gestion de la cohérence d'un HO dispersé sur différentes EPA	Oui, pour lancer et gérer l'AO permettant le choix du prochain HR

Figure 55 : Synthèse de l'utilisation des services par les différents types de Holon

- **Services d'accueil, de gestion et de synchronisation de l'EPA**

Tout d'abord, une EPA gère l'accueil des $(1+p+k)$ I_holons : ce premier service ambiant concerne la I_ressource, qui est hébergée à demeure, mais aussi l'ensemble dynamique de holons mobiles qui constituent le WIP.

Il s'agit essentiellement de mettre à jour les données lors de changements d'état interne ou lors des entrées – sorties de holons.

Chaque EPA accueille p I_Holons Produit, constituant l'encours au pied de la ressource et relatifs aux k I_Holons Ordre correspondants.

Nous pouvons évoquer la liste des règles pour l'entrée d'un produit dans le WIP (l'EPA a reçu un message contenant un couple $\{I_{HO}, I_{HP}\}$ relatif à un flux physique en cours) : l'EPA assure une veille de scrutation par le coupleur RFID :

- lors de chaque nouvel évènement de synchronisation RFID, un nouveau produit entre ou sort du WIP
- l'EPA regarde donc s'il s'agit bien du M_HP concerné par le message :
- si non, chercher un autre message
- si oui, il faut créer le I_HP dans le WIP de l'EPA, charger ses données, puis les mettre à jour, et enfin vérifier si l'EPA héberge déjà le I_HO :
 - si oui, mettre à jour le I_HO ($\text{quantité_produit} = \text{quantité_produit} + 1$)
 - si non, créer le I_HO dans le WIP de l'EPA, charger ses données, puis les mettre à jour
- dans les 2 cas, mettre en place les liens relationnels entre les 2 entités.

Des règles symétriques existent pour une sortie de holon mobile...

Par exemple, la figure 56 montre le diagramme de collaboration lors de l'arrivée d'un holon mobile dans l'EPA.

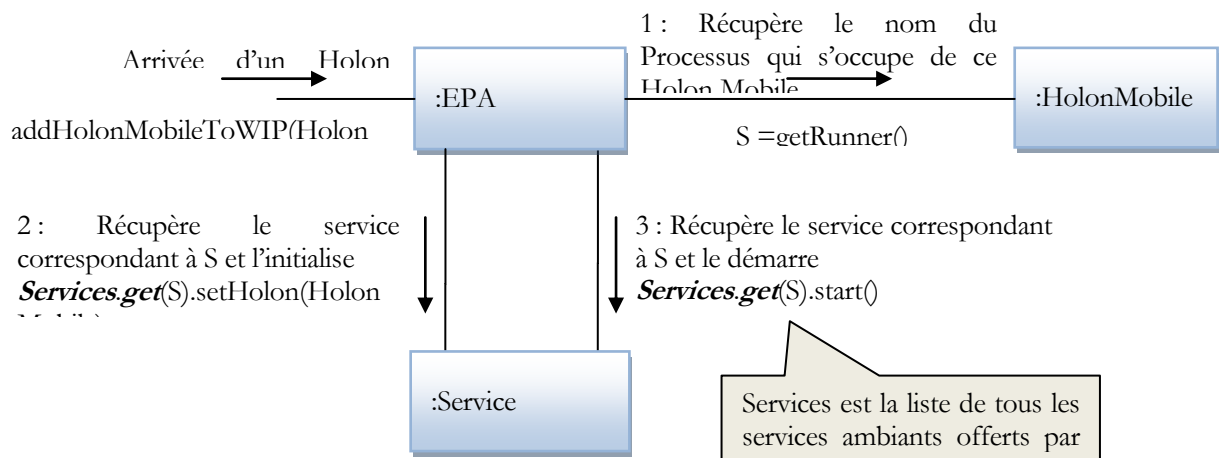


Figure 56 : Diagramme de Collaboration illustrant l'arrivée d'un holon mobile au sein de l'EPA

Le processus d'auto-gestion, activé lors de cette arrivée, gère en fait un modèle d'état. Selon l'état atteint, le comportement du holon varie, avec pour tout état, un ensemble d'autres états atteignables et de services disponibles et/ou activés. Par ailleurs, l'état des informations relatives au holon est actualisé dans le `I_holon` correspondant.

Les figures 57, 58 et 59 montrent respectivement les graphes d'état propres à chaque type de holon.

Chaque graphe d'état propre à un holon est géré par un processus 'léger' de type thread. Cela permet de faire des traitements en tâche de fond, d'exécuter plusieurs instances d'un même code, de s'adresser de manière personnelle à plusieurs holons simultanément... tout en partageant un même espace mémoire, donc le même ensemble de données. Une fois le thread d'un holon lancé, il scrute l'apparition d'événements qui peuvent l'amener à changer l'état du holon et appelle les services *ad hoc* au bon fonctionnement de ce dernier. Il peut éventuellement se mettre en état de veille. Enfin, lorsque le holon mobile quitte le WIP, une sauvegarde des données d'état est effectuée, puis le thread est détruit.

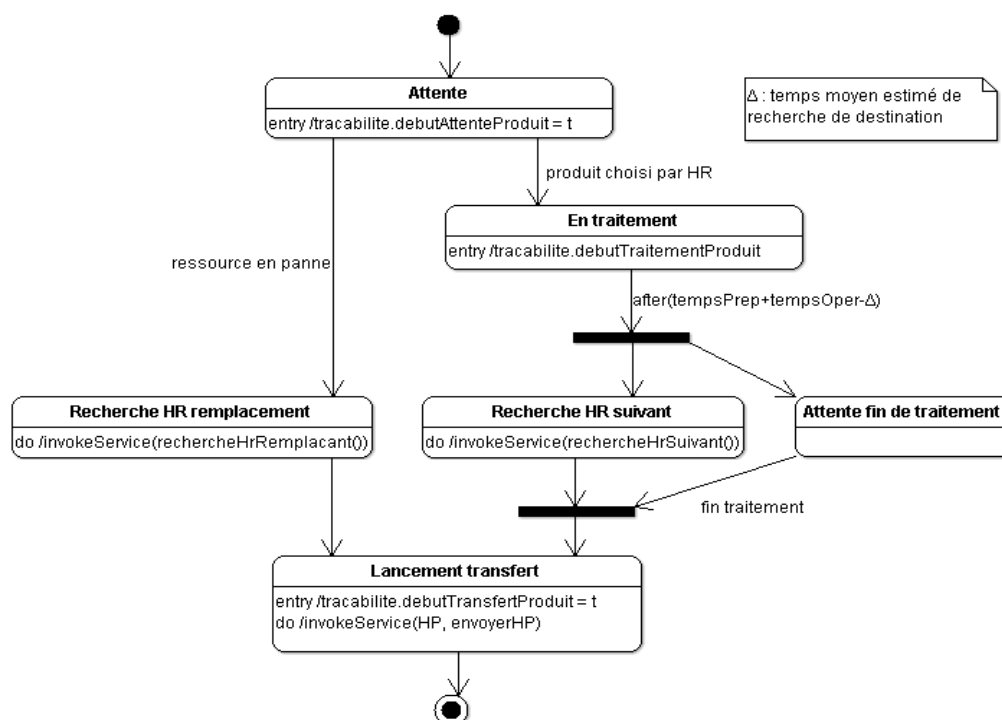


Figure 57 : Graphe d'état d'un Holon Produit au sein d'une EPA

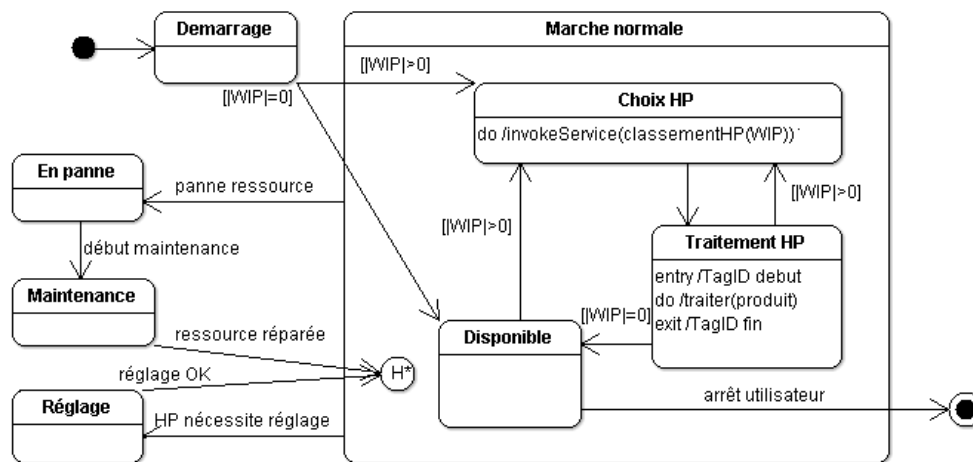


Figure 58 : Graphe d'état d'un Holon Ressource au sein d'une EPA

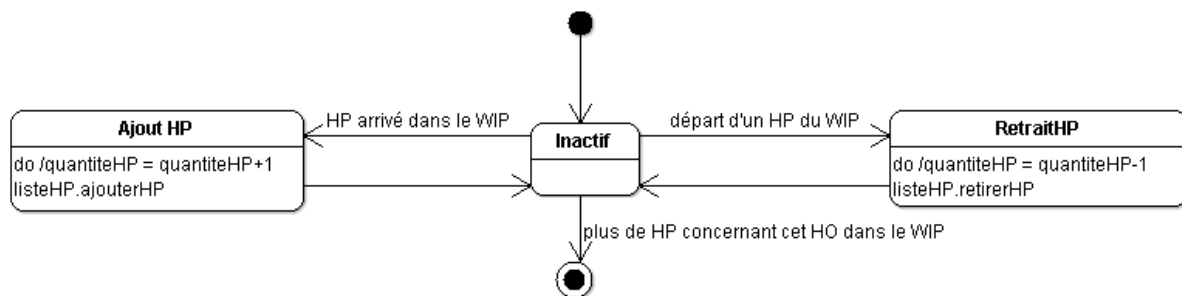


Figure 59 : Graphe d'état d'un Holon Ordre au sein d'une EPA

Lors d'un transfert entre 2 ressources d'un HO et/ou d'un HP, le I_holon transite par un réseau de communication informatique (par un procédé de sérialisation des données) et le M_holon par un système de transitique plus ou moins automatisé.

Les deux parties du holon n'arriveront jamais ensembles : il faut veiller à les rassembler pour reconstituer le holon, qui pourra alors entrer dans le WIP.

Pour cela, chaque EPA est dotée d'un coupleur RFID, qui permet la synchronisation entre le monde physique et le système d'information : quand un produit ou un lot de produits arrive dans l'encours de la ressource (ou le quitte), le Tag correspondant est lu et l'ensemble {I_produit, I_ordre} est actualisé (ajouté ou retiré de la structure d'information constituée par les I_holons hébergés dans l'EPA). D'autres fonctions de service, comme l'archivage, la traçabilité ou l'évaluation de performance, sont hébergées par l'EPA et utilisées par les holons.

• Services d'aide au pilotage

Une EPA est également dotée d'un ensemble de services ambiants visant à organiser les interactions entre les I_holons, de manière à organiser la production et à favoriser la productivité selon des critères qui peuvent être paramétrés et donc configurés de manière *ad hoc*. Le problème de l'auto-organisation de la production repose sur la manière de piloter en temps réel les flux de produits, et donc sur la manière d'engendrer l'émergence d'une solution de pilotage.

Deux situations 'canoniques' existent.

Lorsque les gammes de transformation des produits ne spécifient pas précisément les ressources à utiliser et qu'il existe plusieurs ressources pouvant effectuer une tâche, il faut un mécanisme de choix isoarchique de la ressource qui effectuera la tâche en question. Ceci nécessite un protocole d'interaction mettant en

concurrence des ressources associées à d'autres EPA. Ce problème sera résolu par un service ambiant assurant l'émergence d'une solution par interactions inter holons, c'est-à-dire par échanges de messages et communication entre des I_holons situés sur des EPA distinctes et distantes.

Dans le cas où ces flux sont totalement prédéfinis par les gammes des produits (il n'y a pas de choix possible entre différentes ressources), les EPA reliées en réseau s'échangent des informations relatives à ces flux. Le problème consiste alors à la régulation temporelle et quantitative de ces flux. Ceci constitue l'autre service fondamental supporté par l'EPA : répondre aux sollicitations des I_holons, sur la base des informations les concernant, pour fournir un classement indicatif relatif au choix du prochain produit à traiter, choisi dans le WIP et contribuant à l'obtention d'une solution 'contextuellement' optimale. Le I_produit classé premier et le I_ressource se mettent en interaction directe pour mettre en œuvre cette solution. Si cela s'avère impossible, la suite du classement des HP peut être exploitée.

PROSIS permettrait de traiter ce problème avec des heuristiques tout à fait conventionnelles, principalement monocritère. Pour exploiter pleinement le potentiel de PROSIS, nous nous sommes orientés vers l'utilisation de méthodes d'aide à la décision multicritère, utilisant des données relatives aux holons concernés et permettant d'établir un véritable compromis inter-holons.

Nous verrons par la suite, au travers d'une revue rapide des applications où PROSIS a été testé et validé, que ces mécanismes de décision sont complémentaires et peuvent être utilisés de manière conjointe.

Ainsi, à la suite d'une affectation ayant fait interagir plusieurs ressources d'un même atelier, un produit pourra être ordonnancé localement sur la ressource choisie grâce à un compromis multicritère local.

Autre cas, celui d'une entreprise appartenant à un réseau partenarial qui fera le choix de participer à une interaction inter entreprises pour remporter un appel d'offre relatif à la fourniture de produits après avoir effectué une analyse multicritère relative à l'intérêt d'une telle participation.

Ces deux mécanismes d'aide à la décision, proposés aux I_holons mobiles comme services ambiants, vont être décrits ici de manière indépendante dans les deux paragraphes suivants.

2.6. Modélisation DEVS de l'émergence par l'interaction inter-holonique

Le comportement de différentes EPA hébergeant des I_holons simultanément en interaction est compréhensible à partir du modèle formel du service d'interaction correspondant. Ce service est modélisé à l'aide du formalisme DEVS couplé (figure 62).

Plusieurs formalismes, tels que les Statecharts, les réseaux de Petri ou DEVS (Zeigler *et al.* 2000), permettent de modéliser des systèmes complexes à événements discrets. Nous avons choisi d'utiliser DEVS (*Discrete Event System Specification*) car ce formalisme permet de modéliser facilement des systèmes complexes tout en intégrant intrinsèquement le temps. Il permet de manipuler conjointement les concepts d'état et d'évènement et propose une sémantique opératoire claire et indépendante des modèles. (Zeigler 1976) définit une spécification formelle de modèles à événements discrets : DEVS. Il introduit notamment la possibilité d'évolution autonome du modèle grâce à la durée de vie des états, associée à une fonction de transition interne. DEVS se définit comme un formalisme abstrait universel indépendant de l'implémentation. Le concept de modèles basiques-couplés, introduit ultérieurement (Zeigler *et al.* 2000), fournit un moyen de construire des modèles composés, en réutilisant des descriptions stockées.

Nous présentons ici une rapide présentation du formalisme DEVS.

Un modèle atomique représente un système comportant des entrées et des sorties continues par morceaux et contient un modèle à événements discrets de type DEVS définissant le comportement du modèle. Les signaux d'entrée, de sortie et les états sont abstraits par une forme constante par morceaux où les seuils sont considérés comme des événements discrets. Formellement, un modèle atomique M est spécifié par un septuplé :

$M = \langle X, S, Y, \delta_{int}, \delta_{ext}, \lambda, D \rangle$, où :

X : ensemble des types des événements externes,

S : ensemble des états séquentiels,

Y : ensemble des types d'événements de sortie

$\delta_{int} : S \rightarrow S$ fonction de transition interne définissant les changements d'état dus à des événements internes,

$\delta_{ext} : ST \times X \rightarrow S$ fonction de transition externe définissant les changements d'état dus à des événements externes,

L'ensemble ST des états totaux du système est $ST = \{(s, e) \mid s \in S, 0 \leq e \leq D(s)\}$,

où e représente le temps écoulé dans l'état s ,

$\lambda : S \rightarrow Y$ fonction de sortie,

$\delta : S \rightarrow R^+ \cup \infty$ fonction durée de vie des états.

Les quatre éléments dans le septuplé nommés δ_{int} , δ_{ext} , λ et δ sont les fonctions caractéristiques, S est l'ensemble des variables d'état et X, Y sont respectivement les ensembles d'événements d'entrée et de sortie.

Dans l'objectif d'une rationalisation et d'une composition modulaire hiérarchique, (Song and Kim 1994) ont proposé une représentation graphique normalisée des modèles atomiques, intégrés dans un bloc comportant des ports d'entrées / sorties. La figure 60 introduit un exemple de DEVS atomique, avec :

Un port d'entrée 'A', qui peut recevoir la valeur : a ,

Un port de sortie 'B', qui peut émettre les valeurs : $b1$ ou $b2$,

La variable d'état 'Phase' qui prend les valeurs : Init, Reception, Queue

Une variable d'état ' i ' qui prend des valeurs numériques entières.

L'état des modèles graphiques DEVS est au minimum défini par la variable d'état « Phase » (ses valeurs étant représentées encadrées). Une durée de vie peut être associée à chaque valeur de phase (chiffres à l'intérieur des cercles). Les arcs pleins représentent les transitions externes δ_{ext} ; par exemple, le code "A ? a" sur un arc de ce type indique que l'état du modèle transitera en recevant un événement d'entrée de valeur "a" sur le port d'entrée "A". Les arcs en pointillés représentent les transitions internes δ_{int} : s'il s'écoule une durée de vie δ dans une phase source de ce type d'arc, le code "B ! b1" montre que l'état du modèle transitera et émettra, par la fonction de sortie λ , un événement de sortie de valeur "b1" sur le port de sortie "B" (figure 60). Notons que des conditions sur la valeur des variables d'état peuvent venir compléter la définition d'une transition (e.g. la transition B ! b2 et associée d'une condition sur la variable d'état i , « if $i == C$ », C étant une valeur paramètre constante).

Un modèle DEVS couplé (figure 61) est un modèle structurel. Cette structure est décrite par l'interconnexion de modèles de base. Chaque modèle de base du modèle couplé interagit avec d'autres modèles pour produire un comportement global. Les modèles de base sont soit des modèles atomiques soit d'autres modèles couplés figurant dans une bibliothèque, le couplage de ces modèles se réalise de façon hiérarchique. Un exemple de représentation graphique d'un modèle couplé MC χ (figure 61) montre un modèle constitué d'un modèle couple MC $_B$ et de deux modèles atomiques MA $_A$ et MA $_C$. Les couplages inter-modèles (EIC : couplages d'entrées externes, IC : couplages internes et EOC : couplages de sorties externes) véhiculent des événements externes, internes et de sorties.

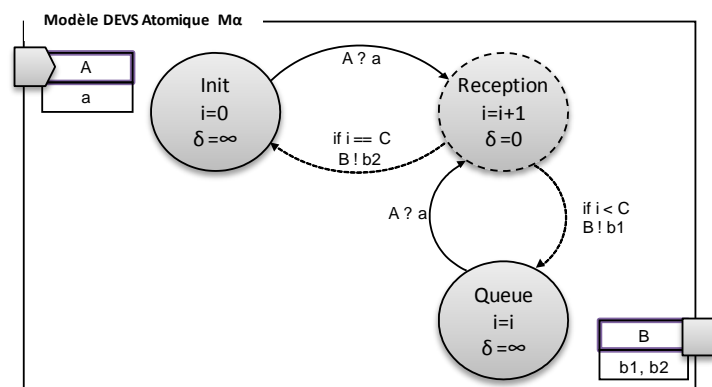


Figure 60 : Représentation Graphique d'un Modèle DEVS Atomique

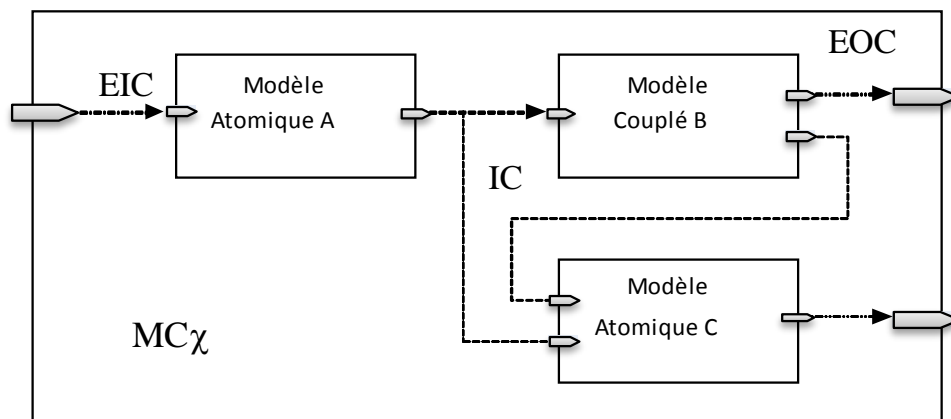


Figure 61 : Représentation graphique d'un modèle DEVS couplé

Nous ne donnons ici qu'une partie de ce modèle (figure 62) : celle correspondant aux modèles DEVS couplés des services ambiants 'Interaction', 'Optimisation' et 'Planning'. Ils constituent donc ici une partie de l'ensemble des composants logiciels que l'EPA offre aux I_holons qu'elle héberge.

Le principe général du service 'Interaction' est fondé, à l'instar des mécanismes d'interaction par enchères formalisés par FIPA (*Foundation for Intelligent Physical Agents*, (FIPA 2003), sur l'émission par une entité initiatrice de l'interaction d'un message initial, appelé Appel d'Offre (AO), et contenant une description du problème à résoudre, puis sur l'émission par les entités réceptrices de l'interaction de réponses potentielles à cet AO (RAO). C'est la meilleure réponse qui emportera l'enchère et qui constituera la solution du problème posé.

Chaque AO est composé d'un code identifiant unique, du code identifiant du holon émetteur, du type d'interaction demandée, de l'isoarchie concernée ainsi que de la totalité des informations nécessaires au traitement de l'AO. Par exemple, dans le cas d'un Holon Produit dans un état λ $HP_{i,\lambda}$ pouvant être transformé à l'état $\lambda+1$ de manière indifférente par un ensemble de ressources $\{HP_k\}$, ces informations contiennent les données du HP et du HO associé qui sont au cœur de l'interaction : ($I_{produit, données}$, $I_{ordre, données}$). Par la suite de ce paragraphe, nous continuerons d'illustrer notre propos par cet exemple. Chaque RAO est composée d'un code identifiant unique, du code identifiant du holon répondant, du code identifiant de l'AO concerné ainsi que de la valeur de la performance estimée.

Cette réponse est transmise à tous les holons de l'isoarchie concernée ainsi qu'au holon émetteur de l'AO. Nous considérons la Trame d'un message comme étant la mise en forme des messages véhiculant ces différents objets : TrameAO et TrameRAO sont des classes d'objet définissant respectivement des AO et des RAO.

Au niveau de la formalisation DEVS, les messages circulant entre les EPA sont des appels d'offre et des réponses et constituent les variables du modèles DEVS :

AO : Appel d'Offre émis par l'EPA associée à un autre HR du système de production et reçu par l'EPA.

RAO : Réponse reçue par l'EPA suite à l'Appel d'Offre précédent et émise par une tierce EPA).

AOL : Appel d'Offre Local émis par l'EPA elle-même, pour la poursuite du processus amenant la valeur ajoutée au HP ou la recherche d'assistance auprès d'un autre HR.

RAOL : Réponse à un AOL, émise par une autre EPA et reçue par l'EPA.

RAOE : Réponse émise par l'EPA, suite à un Appel d'Offre reçu précédemment.

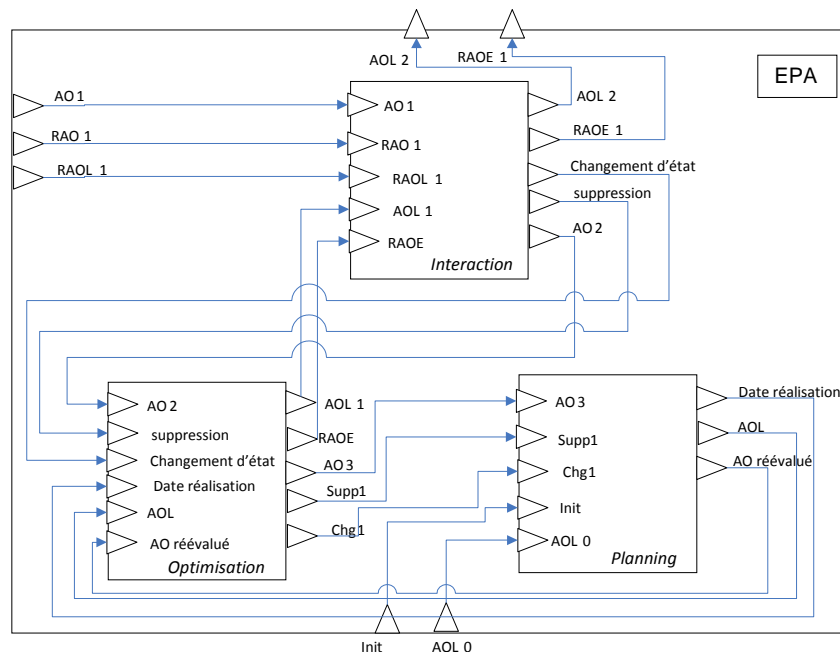


Figure 62 : Modèle DEVS couplé des services 'Interaction', 'Optimisation' et 'Planning'

Les ports d'entrée et de sortie, ainsi que leurs valeurs sont ainsi définis :

Ports d'entrée $X = \{AO1, RAO1, RAOL1, AOL0, Init\}$:

$AO1 = \{TrameAO\}$: indique la réception d'un AO, décrit par une Trame AO.

$RAO1 = \{TrameRAO\}$: indique la réception d'une réponse à un AO, décrite par une Trame RAO.

$RAOL1 = \{TrameRAO\}$: indique la réception d'une réponse à un AOL proposée par une entité sur le réseau. Il est de même type qu'un AO.

$AOL0 = \{TrameAO\}$: de même type qu'un AO.

$Init = \{TrameAO\}$: une liste des TrameAO, nécessaire pour initialiser le planning.

Ports de sortie : $Y = \{AOL2, RAOE1\}$.

$AOL2 = \{TrameAO\}$: un AO local défini par une TrameAO.

$RAOE1 = \{TrameRAO\}$: une réponse de l'entité à un AO, défini par une TrameRAO.

Les fonctions de couplage interne entre les modèles DEVS couplés des services 'Interaction', 'Optimisation' et 'Planning' sont définies graphiquement par les liens décrits sur la figure 62. Nous allons maintenant approfondir ces services et présenter partiellement leur modélisation.

• Modèle DEVS du service ambiant 'Interaction'

Le service 'Interaction' permet d'assurer l'affectation des tâches par la mise en concurrence des HR pouvant potentiellement répondre à un AO.

Pour que le résultat soit cohérent, il faut mettre en œuvre un protocole de décision basé sur des règles et des critères impartiaux et communs. Ce mécanisme de décision appartient à la famille des protocoles d'interaction de la famille ContractNet (Smith 1980).

Il s'agit donc d'observer sur un réseau d'EPA appartenant à une holarchie donnée quel est le HR qui fait la meilleure réponse à un Appel d'Offre donné : c'est à lui que sera confié l'exécution de la tâche correspondante. Par facilité d'expression, nous nommerons EPA le holon qui, au travers du service ambiant offert par l'EPA, joue un rôle dans le mécanisme d'interaction : le holon est en effet représenté par l'EPA, qui joue le rôle d'intermédiaire pour les échanges d'information et l'interaction.

Les principales fonctionnalités de ce service 'Interaction' se résument en deux points :

- la gestion de l'interaction avec les autres EPA, avec la transmission des différentes informations concernant les appels d'offre ou les réponses aux appels d'offre reçus RAO_k venant de l'extérieur vers le service

‘Optimisation’ ou vice versa,

- le positionnement de chaque EPA par rapport aux offres reçues : il est procédé à une mise à jour de la meilleure performance connue pour chaque appel d’offre AO_k ; lorsque le service ‘Optimisation’ fournit la réponse au calcul de performance, cette réponse est comparée avec la meilleure réponse connue.

En fonction de l’évolution des affectations des tâches et des RAO et RAOL qu’il voit circuler sur le réseau, le service ‘Interaction’ gère également l’état des différents AO en cours de traitement :

AO négociable : appel d’offre en cours de négociation, pour lequel éventuellement une première réponse a été reçue, ce qui constitue une performance de référence,

AO engageable : appel d’offre qui est pour l’instant attribué à l’EPA, sa performance étant à cet instant la meilleure ; ce statut peut être perdu si une meilleure offre apparaît, puis regagné si par exemple des disponibilités se libèrent sur le planning de l’EPA,

AO préengagé : appel d’offre engageable et qui est le prochain à être traité sur le planning des tâches de l’EPA (la date de fin de négociation est atteinte),

AO engagé : appel d’offre auparavant préengagé, dont la mise en œuvre est en cours ou sur le point de l’être, et qui à ce titre, est placé de façon ferme et définitive sur le planning de l’entité à la date d’engagement de celle-ci.

Vis-à-vis de ContractNet, ce protocole est simplifié : de nombreux messages de contrôle sont supprimés, car il n’est pas nécessaire que toutes les EPA répondent à chaque sollicitation. En effet, l’idée est de minimiser le nombre de messages d’interaction et de supprimer tout risque de blocage en cas de perturbations dans le système de communication entre EPA.

L’AO est lancé par une EPA ‘initiateur’ auprès de tous les EPA de l’isoarchie considérée, qui sont alors des EPA ‘participant’ à la négociation.

L’EPA ‘initiateur’ représente au travers d’un service ambiant ‘Interaction’, au travers d’un module *ad hoc* de lancement d’Appel d’Offre, le Holon à l’origine du processus d’interaction. C’est d’ailleurs le I_holon de ce holon qui invoque le service en question.

Chacun des holons en interaction participe à l’émergence *via* interaction grâce à son EPA : l’EPA est alors une EPA ‘participant’ qui le représente grâce à ce même service ambiant ‘Interaction’ et à des modules spécialisés de réception des AO, puis de traitement et de suivi des AO reçus.

Une date limite de fin de négociation est associée à l’AO. Tant que cette date n’est pas atteinte, chaque EPA ‘participant’ écoute tous les messages concernant cet AO et enrichit la réponse qu’elle élabore en fonction du contenu de ces messages. Elle répond dès qu’elle peut fournir une réponse concurrentielle, c’est-à-dire uniquement si sa proposition est meilleure que celle(s) déjà envoyée(s) sur le réseau. Si elle ne peut fournir de réponse contenant une meilleure proposition avant la date limite de fin de négociation, elle ne répond pas.

A la date de fin de négociation, toutes les EPA ‘participant’ et l’EPA ‘initiateur’ savent quelle EPA a obtenu l’exécution de la tâche.

La figure 63 illustre ce protocole.

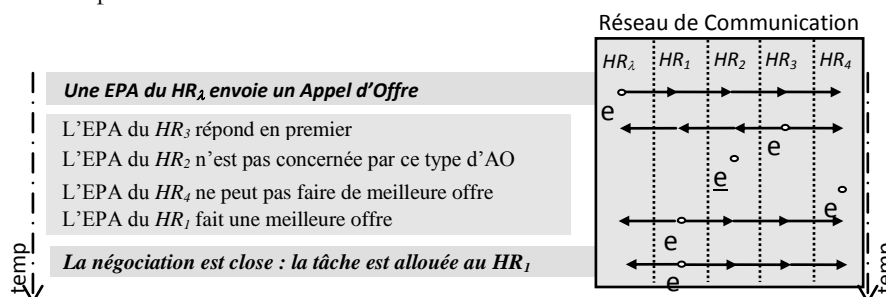


Figure 63 : Déroulement chronologique du protocole d’interaction entre EPA

Ce protocole peut être vu selon la représentation FIPA (FIPA 2002) (figure 64). Nous voyons sur cette

figure que l'EPA 'initiateur' envoie son AO aux m EPA 'participant', et chaque 'EPA participant', s'il a la capacité de répondre, envoie sa réponse aux m-1 autres participants et à l'initiateur. Faisons remarquer que notre protocole d'interaction est simplifié par rapport aux protocoles identifiés par la FIPA et n'utilise pas de systèmes de gestion centralisée de données, type 'blackboard'.

Si aucune proposition n'est émise avant la date limite de fin de négociation, l'AO doit être relancé, après une éventuelle modification. Toutes les EPA peuvent être 'initiateur' et 'participant'. Plusieurs AO sont simultanément en négociation, puisqu'ils correspondent aux différentes tâches à exécuter dans un horizon proche sur chacun des HR.

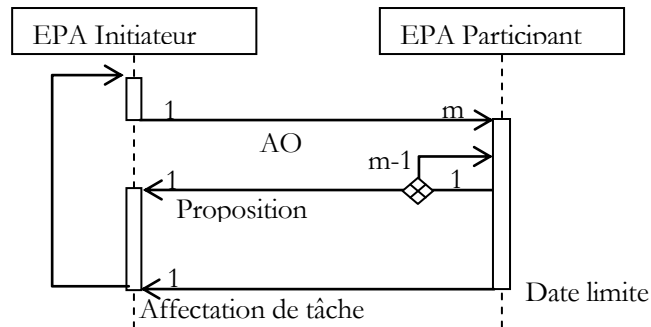


Figure 64 : Représentation FIPA du protocole d'interaction entre EPA

Une EPA peut être donc simultanément 'initiateur' d'un AO et 'participant' de plusieurs autres. Ce protocole d'interaction donne une forte dynamique au système de pilotage. Il confère à l'EPA un comportement intelligent vis-à-vis du fonctionnement global du système auquel il appartient.

Nous avons modélisé le service 'Interaction' à l'aide d'un modèle DEVS couplé composé de trois modèles atomiques (figure 65) :

- le premier modèle atomique gère la réception et la diffusion des AO et des AOL (AO lancés par l'EPA),
- le second traite les réponses reçues RAO et les réponses RAOE fournies par le service 'Optimisation',
- le troisième modèle atomique mémorise toutes les performances RAOL reçues en réponse aux AO émis localement par l'EPA.

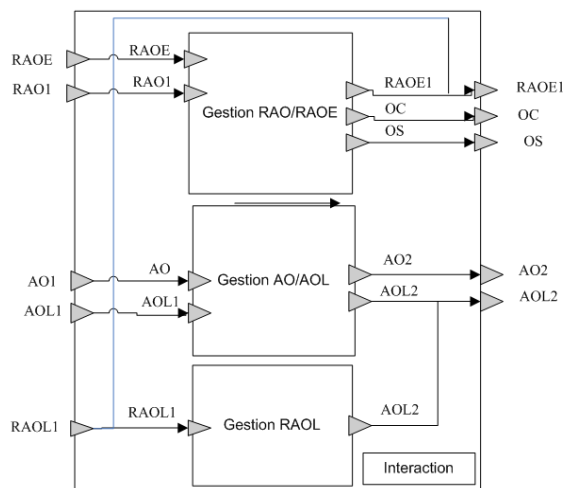


Figure 65 : Modèle DEVS couplé du service 'Interaction'

Nous ne pouvons détailler ici la totalité de ces trois modèles. A titre d'illustration, nous allons examiner le modèle DEVS du sous-module de gestion des AO et des AOL (figure 66). Ce modèle comporte 5 états, 2 ports d'entrée et 2 ports de sortie :

Ports d'entrée

$X = \{AO1, AOL1\}$:

– AO1, AOL1 : du même type qu'un AO.

Variables d'états

$S = \{phase, T, L, L1\}$:

– phase = {Attente initiale, Attente, AO reçu, AOL reçu, insertion}, avec σ : un réel positif égal à la durée maximale de l'état ;

– T : définit une instance de la classe d'objet de type TrameAO ; cette classe d'objet contient les attributs 'Num, Entité, Type, Etat, Date Réception, CE, DL' :

- Num : numéro de l'AO, défini sur un ensemble des entiers ;

- Entité : nom de l'EPA émettrice de l'AO, défini par une chaîne de caractères ;

- Type : décrit la faisabilité de l'AO, et prend ses valeurs dans : {vrai, faux} ;

- Etat : valeurs prises selon l'état de l'AO au niveau du planning de chaque EPA : {négociable, engageable, pré-engagé, engagé} ;

- Date Réception : date de réception de l'AO, de type date ;

- CE : condition d'exécution ;

- DL : délai de fin de la tâche ;

- plus tous les détails relatifs au HP et au HO ;

– L : une liste dans laquelle sont stockés les AO reçus ;

– L1 : une liste dans laquelle sont stockés les AOL émis par l'EPA.

Ports de sortie

$Y = \{AO2, AOL2\}$

– AO2, AOL2 : de même type qu'un AO.

Le modèle atomique reçoit un AO venant d'une des EPA.

Il vérifie d'abord sa faisabilité : il faut que le HR ait la capacité de réaliser l'HO.

Dans l'affirmative, il procède à l'insertion de l'AO dans une liste (L) qui contient tous les AO publiés sur le réseau. Ensuite, il le transmet au service 'Optimisation'.

Ce service peut aussi traiter un AOL proposé par l'EPA elle-même.

Il l'insère dans une liste, puis le diffuse vers l'extérieur

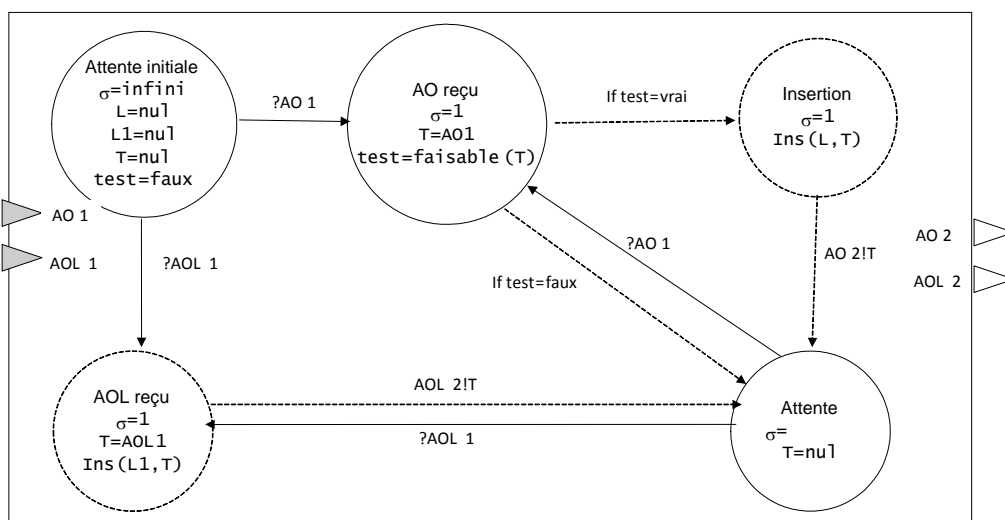


Figure 66 : Modèle DEVS atomique du sous-module de gestion des AO et des AOL

Tout ce mécanisme de prise de décision repose sur la capacité de chaque EPA à proposer une évaluation de

la performance du HR associé pour exécuter une tâche à venir.

Le service ambiant 'Optimisation' permet à l'EPA d'évaluer la capacité d'un holon, par exemple un HR, à effectuer la tâche décrite au travers de l'AO reçu : il s'agit d'estimer la performance correspondante. Cette évaluation de la performance est fondée sur quelques principes intangibles qui rendent de manière fiable le résultat robuste :

- toutes les EPA en compétition pour répondre à un appel d'offre utilisent un mode de calcul identique pour obtenir leur évaluation de performance : la différence entre les résultats qu'elles obtiennent provient des différences de caractéristiques techniques des HR et des différences de leur état courant à l'instant du calcul.

Il y a donc une totale transparence pour l'obtention des résultats,

- les algorithmes d'évaluation de cette performance doivent être basés sur des modèles aussi proches que possible du comportement réel du HR ; pour cela, une modélisation paramétrique (c'est-à-dire dépendant des caractéristiques techniques réelles de la ressource) est utilisée avec comme données le modèle de description de la tâche à évaluer et celui de l'état actuel de la ressource.

Ceci implique une relation très forte entre le service 'Optimisation' d'une EPA et les données du HR associé à cette EPA. Grâce à ces deux conditions, l'émergence de la meilleure solution se fera dans des conditions d'équité et de transparence qui favoriseront la recherche de la meilleure solution. Les méthodes pour élaborer le calcul de la performance sont intimement liées à la nature technique de la ressource (et découlent des propriétés de spécialisation des holons) et aux éléments permettant de juger de la pertinence de la solution. Il s'agit de méthodes d'expertise consistant à utiliser des approches issues de l'intelligence artificielle (système expert), de la recherche opérationnelle (optimisation, analyse multicritère...) et/ou de la fabrication assistée par ordinateur (algorithmes de génération de trajectoires pour machines outils ou robots industriels).

Le service 'Planning' permet d'étudier la possibilité d'insertion d'un AO dans le planning du HR en fonction de l'état des AO en cours de négociation. A partir de là, il calcule la date de réalisation de l'AO. A chaque changement d'état d'un AO, le planning est réévalué. Par exemple, lors du passage de l'état « engageable » à l'état « négociable » d'un AO, cela donne de nouvelles disponibilités pour d'autres AO : la tâche affectée à un HR ne devient ferme que lorsque cette tâche est commencée. Ceci entraîne alors le déclenchement de la réévaluation par le service 'Optimisation' de tous les AO en cours de négociation, afin d'en améliorer les performances.

Ce planning peut être mis en œuvre pour tous les types de holons, sous la forme d'un diagramme de Gantt à une seule ligne : Gantt Ressource pour un HR et Gantt Tâche pour un HP ou un HO.

En résumé, toutes les informations nécessaires à l'évaluation de performances d'un AO par les services de l'EPA se trouvent dans les holons de base de PROSIS. Chaque EPA propose des services directs spécialisés au HR auquel elle est associée. Le HR fournit par exemple des informations sur son planning prévisionnel (données propres au HR qui sont gérées par le service ambiant 'Planning'), ses caractéristiques techniques, ses performances... Les données liées aux HO et aux HP circulent sur le réseau via les Appels d'Offre (AO). Bref, nous pouvons dire que les HR mettent en œuvre les HO sur les HP grâce à la contribution des services ambiants des EPA : c'est ainsi que la valeur ajoutée est donnée à la matière d'œuvre.

Un HR qui a obtenu la responsabilité de l'exécution d'une étape *i* de l'ajout de valeur sur un HP a pour cela évalué au préalable son aptitude pour cela, et a utilisé pour cela un service ambiant vérifiant la faisabilité de la tâche correspondante sur ce HR, service proposé par l'EPA qui lui est associée. Pour cela, l'EPA reprend les termes de l'AOi qu'elle a reçu comme les autres EPA. Cet AOi a été émis par l'EPA en charge de l'étape *i-1*, au nom du HP concerné par cette étape *i-1* et qui a besoin de savoir où se déroulera l'étape *i*. Cet AOi apporte, grâce aux informations contenues dans le HP et le HO associé, une description relative à l'état initial du HP à l'entrée de l'étape *i* : il s'agit de la somme cumulée de tous les ajouts de valeur subis par le HP jusqu'à l'issue de l'étape précédente *i-1*. Il contient également la description de l'état final demandé à l'issue de l'étape *i* (la différence représentant la valeur ajoutée de l'étape *i*, *i.e.* le contenu de la tâche *i* correspondante). Il contient également des éléments techniques sur la manière d'amener cette valeur ajoutée (éléments de la gamme, par exemple). L'AOi est également porteur d'informations liées au HO : priorité, date de début au plus tôt de la tâche et date limite de fin d'achèvement...

L'analyse conjointe de toutes ces données par les services ambiants 'Optimisation' et 'Planning', utilisées pour générer une tâche compatible avec les capacités du HR, associée à la gestion du planning d'occupation de ce dernier, permet l'évaluation de la faisabilité de la tâche sur le HR en question.

Si cette performance se révèle être meilleure que celles éventuellement déjà proposées par d'autres EPA à l'instant de l'obtention de ce résultat, nous avons trouvé une meilleure solution pour l'exécution de la tâche i que le service ambiant 'Interaction' va diffuser auprès de tous les holons concernés, *via* les services de réception de messages de leur EPA respectives.

Au bout d'un certain temps, défini en fonction de la dynamique de l'application, l'AOi est clôturé. Il y a alors affectation de l'AOi : le meilleur HR à cet instant prend en charge l'exécution de la tâche i et veille à l'obtention du résultat final de l'étape i : le HP et le HO contenus dans l'AOi passent alors à l'état pré-engagé sur le planning du HR.

2.7. Modélisation de l'émergence par le compromis inter holonique

Indépendamment des méthodes par négociation, telle que celle par interactions que nous venons de voir, il existe des cas où la désignation de la meilleure solution peut se calculer.

C'est même généralement le cas qui est utilisé dans les systèmes de production, avec le déploiement d'une méthode de type heuristique favorisant l'expression d'un critère de choix lors de l'ordonnancement des tâches en fonction des ressources disponibles. Dans le contexte de notre approche de pilotage isoarchique, cette approche serait contestable, car elle revient à privilégier de manière inégalitaire certains types de holon par rapport à d'autres.

En effet, le choix de telle ou telle heuristique d'ordonnancement revient à employer une règle qui privilégie un critère, c'est-à-dire l'expression de l'intérêt d'un seul type de holons.

Ainsi, l'application d'une heuristique donnée revient à hiérarchiser la prise en compte des différents types de holons : nous ne sommes plus dans le cadre d'une approche égalitaire. Or, chacun de ces holons a des objectifs qui lui sont propres et qui nécessiteraient des prises de décision qui devraient être conjointes et harmonisées.

L'aide à la décision par analyse multicritère permet de prendre en compte et/ou de concilier des intérêts parfois contradictoires. Elle répond bien aux attentes que nous venons d'exprimer, en particulier lorsque les holons concernés ne sont pas distants les uns des autres.

Après un rapide panorama de ces méthodes et une justification du choix de l'une d'entre elles, nous montrons comment s'élaborent localement les prises de décision de pilotage par analyse multicritère inter holonique.

- **Méthode d'analyse multicritère pour l'aide à la décision**

Nous pouvons distinguer trois classes de méthodes multicritères (Mekaouche 2007) : les méthodes d'aide à la décision multicritère, les méthodes élémentaires et les méthodes d'optimisation mathématiques.

Le choix de l'une ou de l'autre des trois classes de méthodes peut dépendre soit des données dont nous disposons pour traiter le problème multicritère considéré, soit de la façon avec laquelle le décideur modélise ses préférences. Dans notre cas, le processus de choix du produit devant être traité par une ressource suppose une connaissance des différentes alternatives possibles pour effectuer un tri par rapport à un ensemble de critères (figure 67).

De ce fait, l'utilisation des méthodes d'optimisation mathématiques n'est pas possible. D'autre part, l'objectif étant d'effectuer un classement, les méthodes élémentaires ne sont pas considérées.

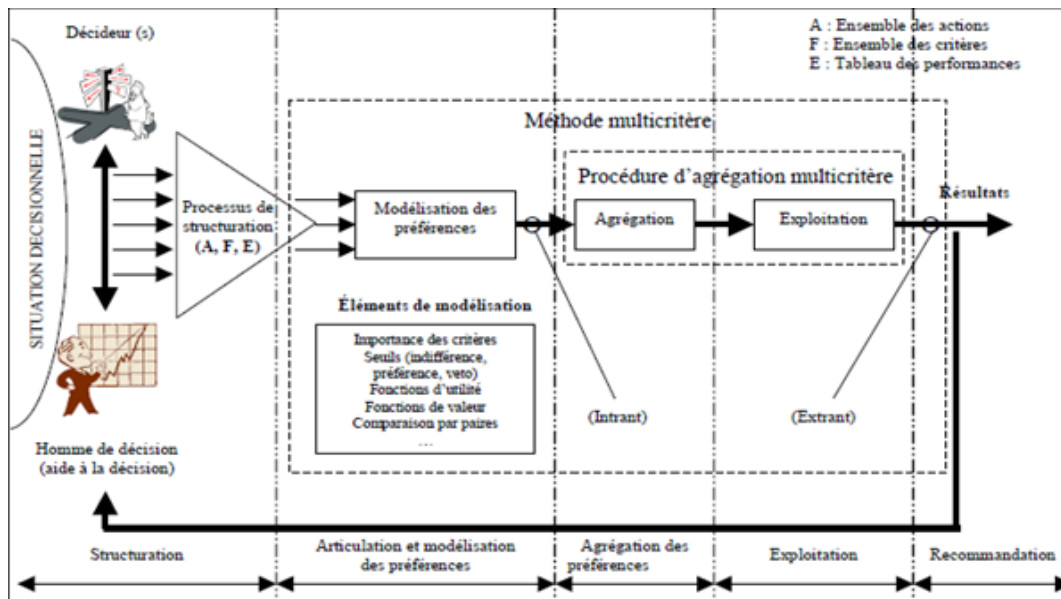


Figure 67 : Représentation du processus d'aide à la décision multicritère (d'après (Guitouni *et al.* 1999))

Les méthodes d'aide à la décision multicritère permettent d'apporter une aide au décideur au cours de l'affinement de son processus de décision qui porte sur le choix d'une alternative parmi un ensemble d'alternatives potentielles. Par exemple, l'ensemble des produits dans la file d'attente (encours) d'une ressource constitue l'ensemble des alternatives. Il s'agit d'effectuer le classement de l'ensemble des alternatives, en examinant la logique, la cohérence des choix, puis en agrégeant les préférences, selon l'une des trois approches complète, partielle ou locale.

Dans le cadre des problèmes multicritères traités au niveau d'un système de pilotage isoarchique tel que PROSIS, la solution doit être le résultat de l'interaction de tous les critères considérés et apparaît comme étant le meilleur compromis possible. Par conséquent, aucun critère relatif aux différents holons entrant dans le processus décisionnel ne doit être mis à l'écart au cours du processus de décision. Pour cela, nous nous sommes focalisés sur les méthodes d'agrégation complète. De plus, l'agrégation complète est une méthode fortement compensatoire, ce qui n'est pas le cas des méthodes d'agrégation partielle, qui sont des méthodes non compensatoires. En ce qui concerne les méthodes d'agrégation locale, une critique généralement adressée à cette approche correspond à la difficulté de définir les conditions d'arrêt du processus de recherche de solutions ou de garantir la satisfaction du décideur après un nombre déterminé d'itérations.

Pour toutes ces raisons, nous avons fait le choix des méthodes d'agrégation complète pour le classement de l'ensemble des produits de l'encours d'une ressource, principalement parce qu'elle n'écarte aucun critère lors du processus de classement (Ounnar 1999).

Plusieurs méthodes existent (Mekaoouche 2007) : TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution), MAVT (Multiple Attribut Value Theory), MAUT (Multiple Attribut Utility Theory), SMART (Simple Multiple-Attribut Rating Technique), UTA (Utility Theory Additive), EVAMIX (EVALuation of MIXed criteria), AHP (Analytic Hierarchy Process) ou encore ANP (Analytic Network Process).

Nous avons choisi d'utiliser AHP ou ANP pour leurs propriétés structurantes et formalisantes.

- **AHP (Analytic Hierarchy Process)**

La méthode AHP (Saaty 1980) décompose un problème complexe de décision en un ou plusieurs niveaux de détails où l'évaluation des valeurs est fournie par des comparaisons par paires.

Contrairement aux autres méthodes, AHP est la seule qui permet d'une part la mesure de la cohérence des préférences du décideur et d'autre part la prise en compte à la fois de l'indépendance et de l'interdépendance

des critères d'évaluations considérés. La prise en compte de l'interdépendance se traduit par la construction d'une structure hiérarchique reflétant ainsi les différents niveaux selon les relations liants les critères (figure 68).

Les éléments de la hiérarchie (critères, sous critères, alternatives) ne sont pas forcément liés entre eux, néanmoins ils peuvent être groupés dans des ensembles disjoints.

Par conséquent, cette méthode permet l'utilisation de listes complètes de critères d'évaluation sans n'en exclure aucun. Elle permet également l'usage pour une même liste de critères d'évaluation de différents jeux de pondération qui permettent en fait de configurer la prise de décision en fonction de l'orientation politique ou stratégique voulue.

Notons également que la méthode AHP permet la prise en compte de critères qualitatifs et quantitatifs.

Toutes ces caractéristiques constituent les points forts de la méthode AHP (Ounnar 1999, Ounnar & Pujo 2005, Ounnar *et al.* 2007).

Dans le but de fournir une approche structurante, des vecteurs de priorités sont établis en utilisant des mesures de cohérence. La méthode AHP est donc un processus de mesure à l'intérieur de structures hiérarchiques, permettant d'exprimer ses préférences parmi plusieurs critères et indicateurs, afin d'obtenir un classement des alternatives utilisant les pondérations relatives des critères et indicateurs. Le classement est obtenu par comparaisons successives par paires, c'est-à-dire que chaque élément de la prise de décision de classement fait l'objet de comparaison deux à deux pour l'ensemble des éléments de même nature. AHP est donc un processus de prise de décision multicritère formel qui interprète directement des données et des informations et surtout qui peut être totalement automatisé.

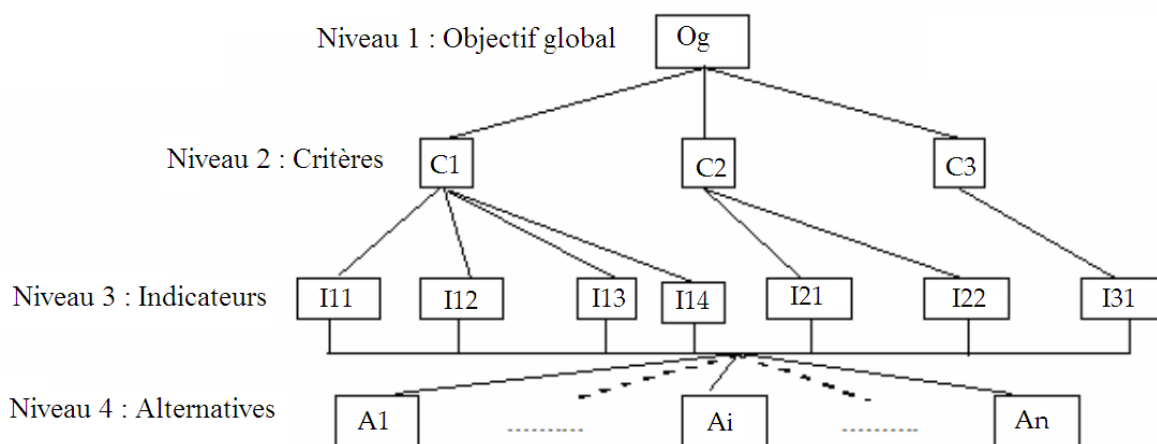


Figure 68 : Structure hiérarchique classique utilisée dans AHP

Un algorithme de décision multicritère appliquant AHP est donc implanté en tant que service ambiant dans chaque EPA : c'est un outil mis à la disposition des holons par chaque EPA, utilisé en fonction des besoins de ces holons et permettant de définir un classement entre différents holons, prenant en compte différentes contraintes relatives aux HR, HP et HO.

Par exemple, pour un HR venant d'achever le traitement d'un M_produit donné, le classement multicritère des I_produits restant dans le WIP est intéressant. Bien entendu, seul le I_produit classé en première position présente un réel intérêt, car il correspond au prochain M_produit à traiter par la ressource.

Autre exemple, pour un HP quelconque, l'algorithme peut lui donner une indication sur sa probabilité de traitement plus ou moins rapide, en fonction du résultat de sa position dans le classement : le HP peut alors éventuellement modifier certains de ses paramètres pour tenter de modifier les caractéristiques de son flux d'écoulement dans le système de production.

La mise en œuvre d'un service ambiant pour l'aide à la décision multicritère s'effectue donc par l'application de l'algorithme AHP, selon deux grandes phases que nous allons maintenant détailler : la configuration et l'exploitation.

Pour pouvoir utiliser l'algorithme AHP pour classer les produits situés dans les files d'attente, il faut au préalable régler le paramétrage de l'importance relative des critères et de leurs indicateurs. Ceci configure la comparaison par paires entre les différents critères C_i par rapport à leur importance dans la décision de choix du HP. Cette phase 'statique' de l'algorithme (c'est-à-dire que cela sera effectué initialement pour chaque mode d'utilisation de l'algorithme implanté sur une EPA, en fonction du HR et de l'ensemble des HPs pouvant le traverser) doit être validée par une vérification mathématique de cohérence.

Tout d'abord, il s'agit de classer les critères par rapport à un objectif global.

Nous construisons pour cela une matrice $[C]$ où chaque élément c_{ij} est un jugement ou une comparaison entre une paire de critères C_i et C_j , selon une échelle 1-9, avec $c_{ij} = 1 / c_{ji}$ & $c_{ii} = 1$ (figure 69).

Cette matrice permet de déterminer le vecteur d'importance relative $[V_{COg}]$.

Des vérifications de cohérence permettent de détecter et de corriger les poids affectés : toute incohérence constatée nécessitant une redéfinition des paramètres d'importance relative.

Ensuite, il s'agit, vis-à-vis de l'ensemble des critères C_k , d'établir un classement de chacun des indicateurs I_{kx} par rapport à son critère C_k .

Valeurs	Définition
1	Également important (aucune préférence)
3	Légèrement plus important
5	Fortement plus important
7	Très fortement plus important
9	Absolument plus important (une préférence absolue)
2, 4, 6, 8	Valeurs intermédiaires pour mettre en évidence des compromis
Valeurs inverses	Utilisées pour montrer la dominance du second élément par rapport au premier.

Figure 69 : Échelle de valeur adoptée dans AHP pour la comparaison par paire

A cet effet, nous construisons une matrice $[I_{Ck}]$ où chaque élément $i_{k,ij}$ est un jugement ou une comparaison entre une paire d'indicateurs I_{ki} et I_{kj} .

Pour chaque matrice $[I_{Ck}]$, nous estimons le vecteur d'importance relative $[V_{ICk}]$ selon le même principe, avec validation de la cohérence de la matrice $[I_{Ck}]$.

La phase d'exploitation dynamique de l'algorithme AHP permet de classer les HPs de la file d'attente.

Premièrement, il s'agit d'établir un classement des HPs par rapport à chaque indicateur I_{kx} de chaque critère C_k .

Pour chaque indicateur, nous comparons deux à deux les valeurs de l'indicateur entre les HPs de la file d'attente.

Nous pouvons ainsi construire une matrice $[P_{kx}]$, avec : $p_{kx,ij} = I_{kx,j} / I_{kx,i}$ pour minimiser le critère et $p_{kx,ji} = I_{kx,i} / I_{kx,j}$ pour le maximiser, $p_{kx,ji} = 1 / p_{kx,ij}$ et $p_{kx,ii} = 1$.

Nous appellerons $[V_{PIk,x}]$ le vecteur d'importance relative entre PHs qu'il est alors possible de calculer.

Ensuite, il faut remonter dans la hiérarchie de choix relatifs, car le but est de déterminer l'importance relative des HPs par rapport à l'objectif global.

La matrice $[PI_k]$ est construite, où chaque colonne est un vecteur $[V_{PIk,x}]$.

Un vecteur donnant l'importance relative des produits par rapport aux critères est construit, et ceci, pour chacun des critères : $[PC_k] = [PI_k] * [V_{ICk}]$.

Les vecteurs $[PC_k]$ permettent de construire une matrice $[PC] = [PC_1, PC_2, ..., PC_n]$.

Le produit $[PC] * [V_{COg}]$ fournit le vecteur de priorité $[V_{POg}]$ des HPs considérés, dont la plus grande composante v_{POgy} correspond au HP y à choisir.

- **ANP (Analytic Network Process)**

La méthode ANP (Saaty 1996, Saaty 2005) est une généralisation de la méthode AHP. En effet, cette méthode tient compte, en supplément à la dépendance hiérarchique, de la dépendance directe entre les critères et les indicateurs.

ANP fournit une structure générale en réseaux qui permet de prendre des décisions sans faire des suppositions d'indépendance entre les éléments de plus hauts niveaux et les éléments de niveaux inférieurs de la structure hiérarchique : ANP utilise une structure décisionnelle en réseau sans avoir le besoin de spécifier des niveaux. Comme dans la méthode AHP, l'importance relative est un concept central. La structure de réseau plus libre d'ANP rend possible la représentation d'un quelconque problème de décision (figure 70).

Les relations dans un réseau sont représentées par des flèches. Le sens de la flèche donne la dépendance. L'interdépendance directe entre deux nœuds distincts peut désigner une dépendance externe (*outré dépendance* – dépendance entre indicateurs relevant de critères différents) et est représentée par une flèche ou une flèche bilatérale. L'interdépendance directe peut également désigner une dépendance interne (*inné dépendance*) entre des éléments d'un même nœud et est représentée par un arc de retour.

Il est à noter qu'un réseau de décision multicritère ANP où les dépendances directes sont inexistantes est équivalent à une structure hiérarchique AHP : AHP est un cas particulier d'ANP.

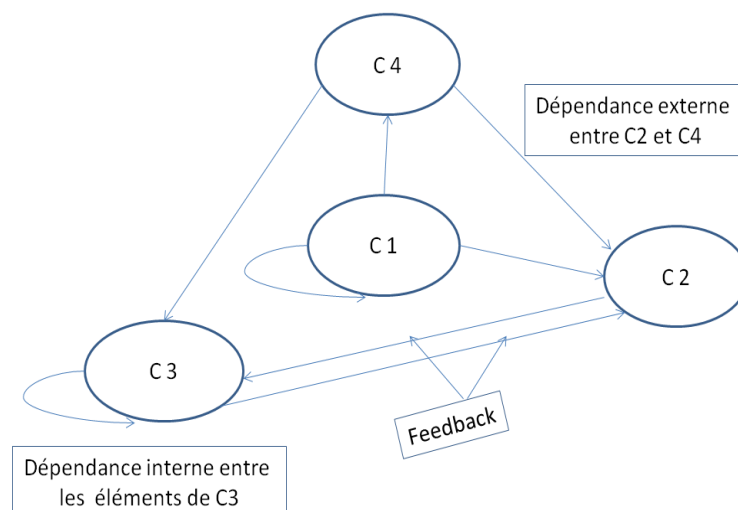


Figure 70 : Dépendance interne et externe entre les composants d'un réseau ANP

2.8. Mise en perspective des holons, de l'EPA et des services associés

La figure 71 synthétise de manière schématique la mise en perspective des différents concepts que nous avons présentés en vue de la mise en œuvre d'un système de pilotage holonique, isoarchique et multicritère, fonctionnant grâce au soutien d'Entités de Pilotage Ambiant.

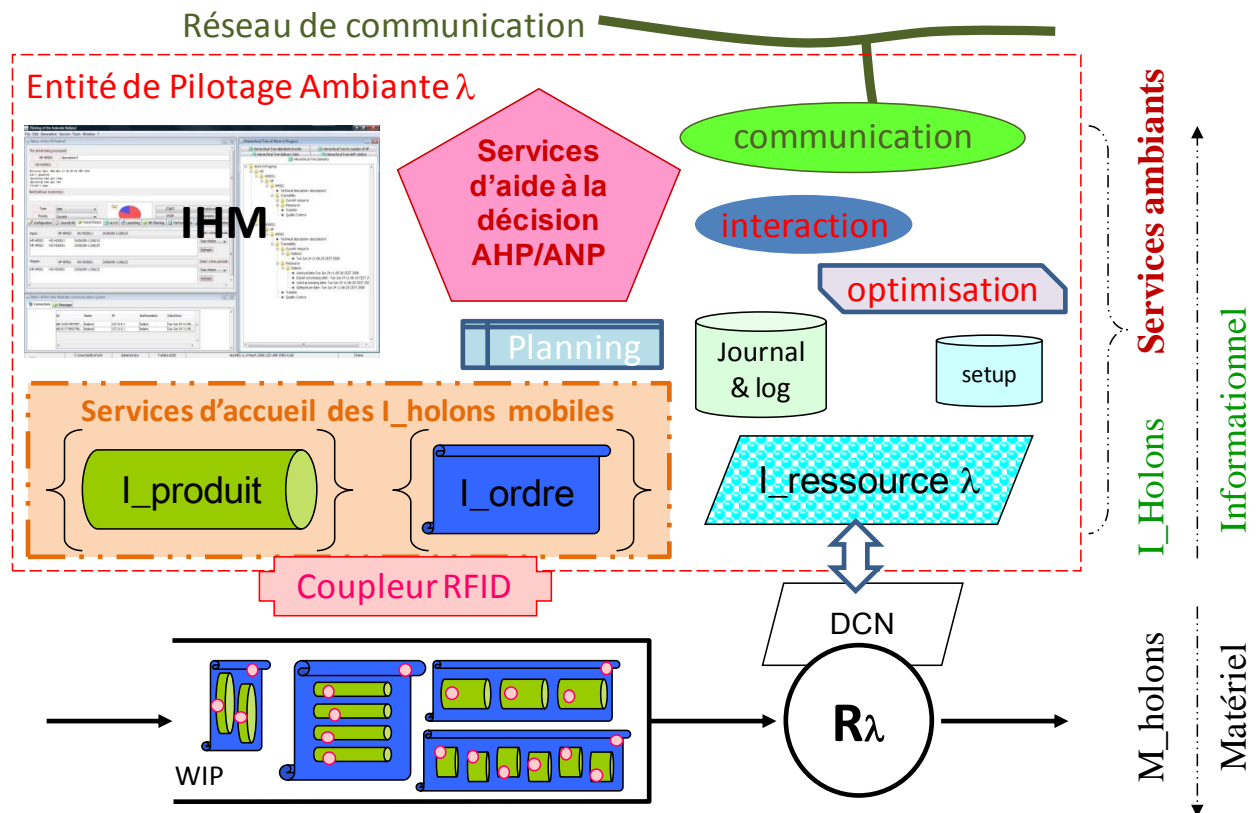


Figure 71 : Schéma représentant une EPA et les holons hébergés

3. MISE EN ŒUVRE DE PROSIS

Nous allons présenter dans cette partie, à titre d'applications, quelques mises en œuvre de l'approche PROSIS sur différents systèmes réels, étudiés *via* des techniques de simulation-émulation.

Nous présenterons ainsi successivement le pilotage isoarchique d'un Système de Production Flexible (cellule de tournage automatisée) , celui d'un Système de Transport Robotisé (Hub de triage fer-fer), celui d'un Système de Stockage Robotisé (parking automatisé) , celui d'une chaîne logistique à reconfiguration dynamique (réseau logistique auto organisé) et celui d'un atelier plus conventionnel (Job Shop), mais fonctionnant en flux tiré .

Dans chaque cas, après une description du contexte, nous montrerons comment PROSIS est mis en œuvre, nous décrirons succinctement les solutions technologiques mises en œuvre ainsi que les résultats obtenus.

3.1. Pilotage isoarchique d'une cellule de tournage automatisée flexible

- **Présentation de l'application**

La première application proposée concerne une cellule flexible de tournage, composée de 4 tours à commande numérique ayant des capacités différentes (puissance de broche, capacités dimensionnelles (diamètre maximum des objets produits...), outillage...), d'un certain nombre de postes périphériques spécialisés (mesurage, lavage) et de 2 robots portiques (permettant la manipulation des pièces fabriquées entre les ressources). Cette cellule permet de réaliser des pièces de révolution et est dotée de zones palettes lui permettant de stocker quelques pièces en cours de fabrication, d'un magasin contenant un ensemble d'outils standard interchangeables, et enfin de zones palettes contenant les pièces brutes et celles recevant les pièces usinées, ces zones constituant l'interface avec le reste de l'atelier (zones d'entrées-sorties).

Les ressources composant cette cellule flexible de tournage accomplissent des tâches de production s'articulant autour de cinq « métiers » différents : l'usinage de pièces mécaniques de révolution par tournage, la manipulation robotisée de pièces mécaniques de révolution, leur stockage, leur mesurage et leur lavage. Dans cette configuration de base (figure 72), la cellule flexible de tournage est composée de l'ensemble de ressources suivant : {Tour T1, Tour T2, Tour T3, Tour T4, Robot R1, Robot R2, Machine à Mesurer MM, Machine à Laver ML, Stock S}.

Chacune de ces ressources est un Holon Ressource auquel est associée une EPA.

Les HR 'tours à commande numérique' utilisent comme description de tâches un langage normalisé enrichi d'instructions assurant la synchronisation avec les autres HR. Les HR 'robots' utilisent un langage effecteur du type AML, également enrichi des mêmes instructions de synchronisation. Les autres HR, qui sont des machines périphériques, utilisent plusieurs catégories de cycles prêts à être exécutés et qu'il est possible de lancer indifféremment.

Nous sommes donc face à un Système de Production Automatisé et Flexible qui fonctionne en Job Shop avec des ressources hétérogènes. L'accent sera mis sur l'optimisation des conditions d'exécution de chaque tâche sur la machine à laquelle elles seront affectées. Pour cela, les tâches de production à effectuer seront décrites à un niveau d'intelligibilité permettant leur projection optimale sur un ensemble hétérogène de machines.

La flexibilité de la cellule relève de la nature intrinsèquement flexible des ressources qui la composent : des tours à commande numérique et des robots industriels. Elle atteint en fait son maximum du fait de la non prédéfinition des flux de pièces : toutes les affectations de tâches de transformation (tournage) et de manipulation (transfert) vont être effectuées en temps réel, en fonction de la tâche elle-même, mais également de l'état des ressources candidates. C'est dans ce cadre que la mise en œuvre de PROSIS se trouve adéquate : toute tâche de transformation ou de manipulation de pièce va faire l'objet d'une recherche de la ressource affectée à son exécution. Toutes les ressources potentielles vont être mises en concurrence, au travers de l'émission d'un Appel d'Offre et de la prise en compte de leurs réponses.

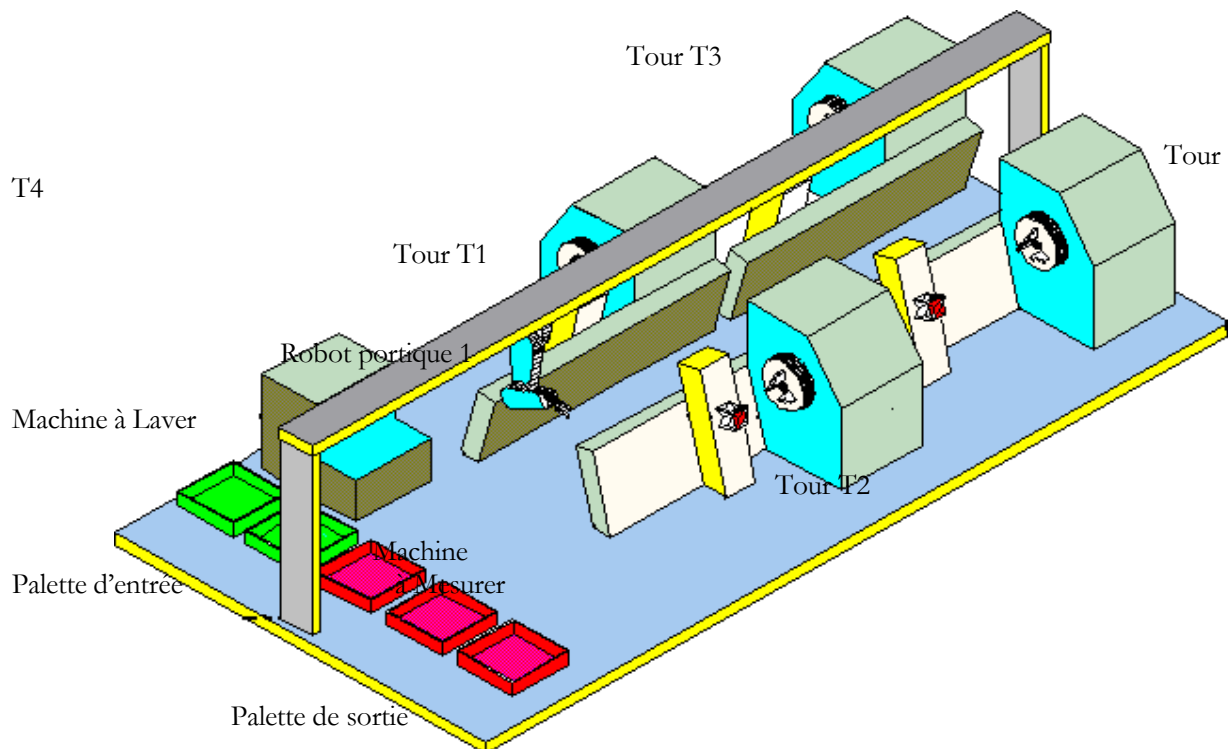


Figure 72 : Visualisation d'une cellule de tournage automatisée flexible

• Modélisation PROSIS

L'Appel d'Offre considéré sera diffusé auprès d'une isoarchie constituée des holons hébergés par les EPA associées aux Holons Ressource ayant les compétences 'métier' permettant d'envisager l'élaboration d'une réponse.

La construction de la réponse par un Holon Ressource à un Appel d'Offre reçu par son EPA résulte de l'interaction entre les I_holons contenus dans cet AO et les I_holons déjà hébergés dans l'EPA : c'est un calcul local.

La performance d'un HR est calculée par le service ambiant *ad hoc* de l'EPA. Elle dépend à la fois du coût de l'usinage du produit sur la ressource et du coût des différentes attentes du produit dans le WIP associé à la ressource.

Lors d'une étape de transformation relevant d'un flux dynamique, les coûts d'usinage peuvent varier en fonction de la ressource. En effet, la connaissance du processus contenue dans le I_produit est incomplète tant que la ressource n'est pas précisée : elle doit être précisée par une interaction I_produit-I_ressource. La gamme du I_produit indique la chronologie des phases de transformation concernant chacune tel ou tel type de machine. Pour chaque phase, il est indiqué le mode de maintien en position de la pièce sur la ressource, l'état d'usinage à atteindre (le profil temporaire du produit à la fin de la phase) et la liste ordonnée des opérations de tournage nécessaires pour y arriver. Ceci est réalisé au travers d'une interface graphique de programmation de tâche de tournage, dont un exemple est fourni en figure 73. Chaque phase d'une pièce est ainsi définie par son profil initial, son profil final, les conditions de prise de pièce et la liste des opérations, choisies dans une liste d'opérations possibles, telles que le chariotage, le dressage, le cycle d'ébauche, le rainurage, le perçage, le forage, le filetage et le contournage de finition, pour des profils externes et internes (alésage).

Les I_tours font donc appel à un service spécialisé de leur EPA, pourvu d'algorithmes de génération automatique de trajectoires d'outils (Mognol *et al.* 1994, Anselmetti *et al.* 1995, Broissin 1999). Ces algorithmes permettent de créer un cycle de trajectoires d'usinage pour chaque type d'opérations précédemment cité. Pour les opérations d'ébauche, il faut déterminer au préalable le profil d'ébauche avant

finition, en créant un contour parallèle laissant une surépaisseur de matière pour la finition ultérieure, ainsi que les conditions de coupe (profondeur de passe, avance par tour, vitesse de coupe) en respectant la théorie de Taylor relative à la durée de vie des outils coupants, le tout en minimisant le temps d'usinage. Le cycle de la trajectoire d'ébauche est défini avec des données issues du I_produit (profil de la pièce au début de la phase, profil désiré de la pièce à la fin de la phase ...), de la I_ressource (courses utiles, couple disponible à la broche, diagramme de puissance de broche...) et de l'interaction entre les deux (conditions de coupe...). Pour les opérations de rainurage en plongée, le cycle d'ébauche respecte l'angle de talonnement, l'angle de plongée et des conditions de coupe spécifiques. Pour les opérations de finition, il faut prendre en compte différentes options, telles que le type d'interpolation lors de l'engagement de l'usinage (linéaire ou circulaire), la direction de l'usinage (sens trigonométrique ou anti trigonométrique), la compensation du rayon de plaquette...

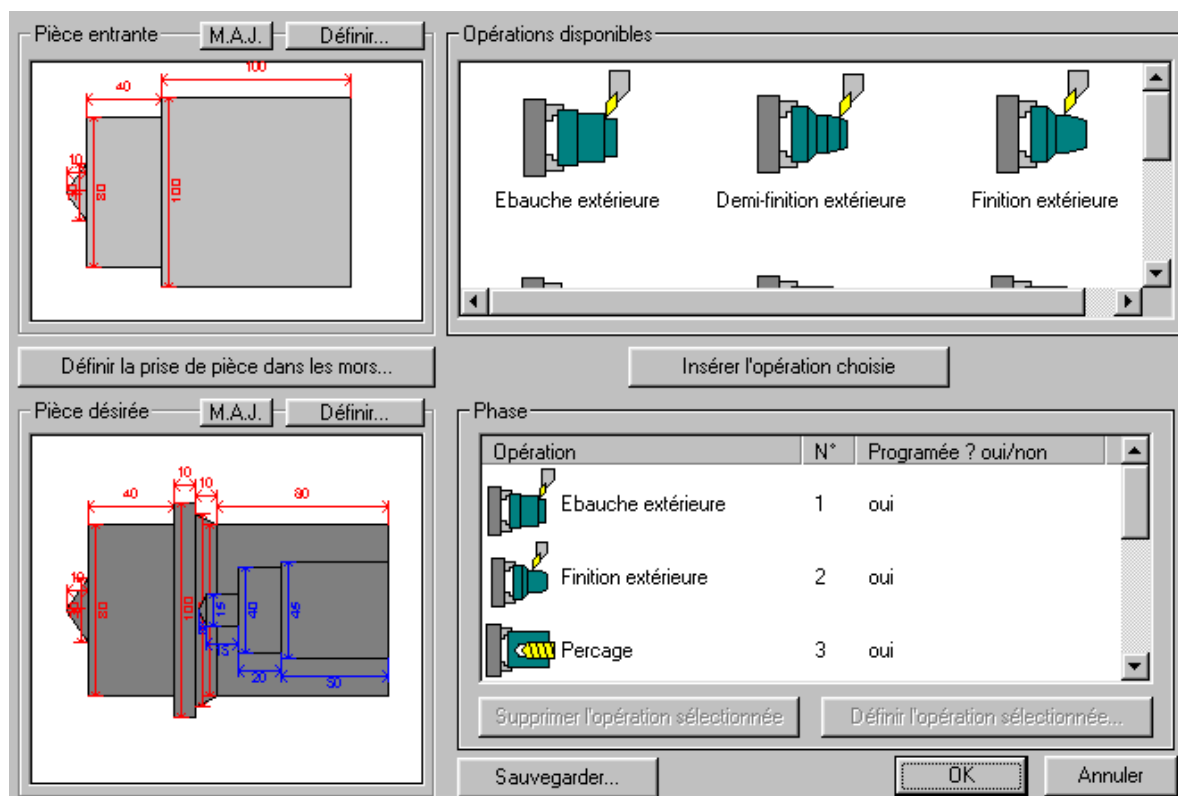


Figure 73 : Programmation graphique de tâches d'usinage en tournage

La totalité des trajectoires que suivent les outils durant les opérations d'usinage doit être transformée en coûts d'usinage.

Chaque $i^{\text{ème}}$ trajectoire élémentaire de la $j^{\text{ème}}$ opération a une durée d_{ij} : la longueur de la trajectoire l_{ij} divisée par la vitesse d'avance de l'outil, *i.e.* a_{ij} (avance par tour) $\times N_{ij}$ (vitesse de broche).

Chaque opération d'usinage nécessite un outil coupant spécifique : le temps de changement d'outil $tc_{h_{j+1}}$ doit être additionné.

Ces deux temps doivent être comptés au coût horaire H_k du HR $_k$, donnée connue de la I_ressource $_k$.

Le dernier coût additionnel des opérations d'usinage provient du coût d'usure des outils coupants. Le modèle de Taylor relatif à la durée de vie des arêtes coupantes donne ce coût, avec :

b_{ij} : un booléen valant 0 pour un déplacement rapide et 1 pour une trajectoire d'usinage,

V_j : la vitesse de coupe,

K & n : les constantes de Taylor pour le couple (outil utilisé par le HR, matière du HP),

P_j : le prix de la Plaquette utilisée pour la $j^{\text{ème}}$ opération d'usinage

et n_a : le nombre d'arêtes par plaquette. *In fine*, le coût des phases d'usinage C_{usinage} est :

$$C_{\text{usinage}} = \sum_{j=1}^p \left\{ \left(\sum_{i=1}^{r_j} \frac{lt_{ij}}{a_{ij} N_{ij}} \right) \cdot H_k + (tch_{j,j+1} \cdot H_k) + \left(\sum_{i=1}^{r_j} \frac{b_{ij} \cdot lt_{ij}}{a_{ij} \cdot N_{ij} \cdot K \cdot V_j^n} \frac{P_j}{n_a} \right) \right\}$$

A ces coûts s'ajoutent les coûts d'attente C_{attente} . Lorsque une machine est immobilisée, le coût correspond à la durée du blocage multipliée par le cout horaire d'usage de la ressource, sur la ressource d'origine pour une post synchronisation ($t_{\text{post}} \cdot H_k$) et/ou sur la ressource d'arrivée pour une pré synchronisation ($t_{\text{pré}} \cdot H_{k+1}$). Lorsque le produit est en attente dans le WIP, le coût est un coût d'immobilisation. Ce dernier coût est basé sur le temps de cette attente t_{att} , le prix unitaire du produit P_p et un taux d'immobilisation à court terme t_{ict} . D'où :

$$C_{\text{attente}} = (t_{\text{post}} \cdot H_k) + (t_{\text{pré}} \cdot H_{k+1}) + (t_{\text{att}} \cdot P_p \cdot t_{\text{ict}})$$

Toutes ces données proviennent de la I_ressource, du I_produit et de l'interaction entre le I_ordre, le I_produit et la I_ressource, dans le cadre des services 'Planning' et 'Génération de Tâches' de l'EPA. Le service 'Génération de Tâches' de l'EPA spécifique au HR associé. Le contenu des fonctions de génération de tâches, dont le principe est totalement similaire aux algorithmes utilisés dans les logiciels de Fabrication Assistée par Ordinateur, est élaboré au regard des propriétés de spécialisation du HR. Ainsi, tous les HR 'Tour à Commande Numérique' ont les mêmes caractéristiques 'métier' et le service ambiant 'Génération de Tâches' offert par leur EPA est restreint aux opérations de tournage.

La somme des coûts $C_{\text{usinage}} + C_{\text{attente}}$ représente l'évaluation de performance permettant d'obtenir une réponse à l'appel d'offre RAO_{ik} (figure 74).

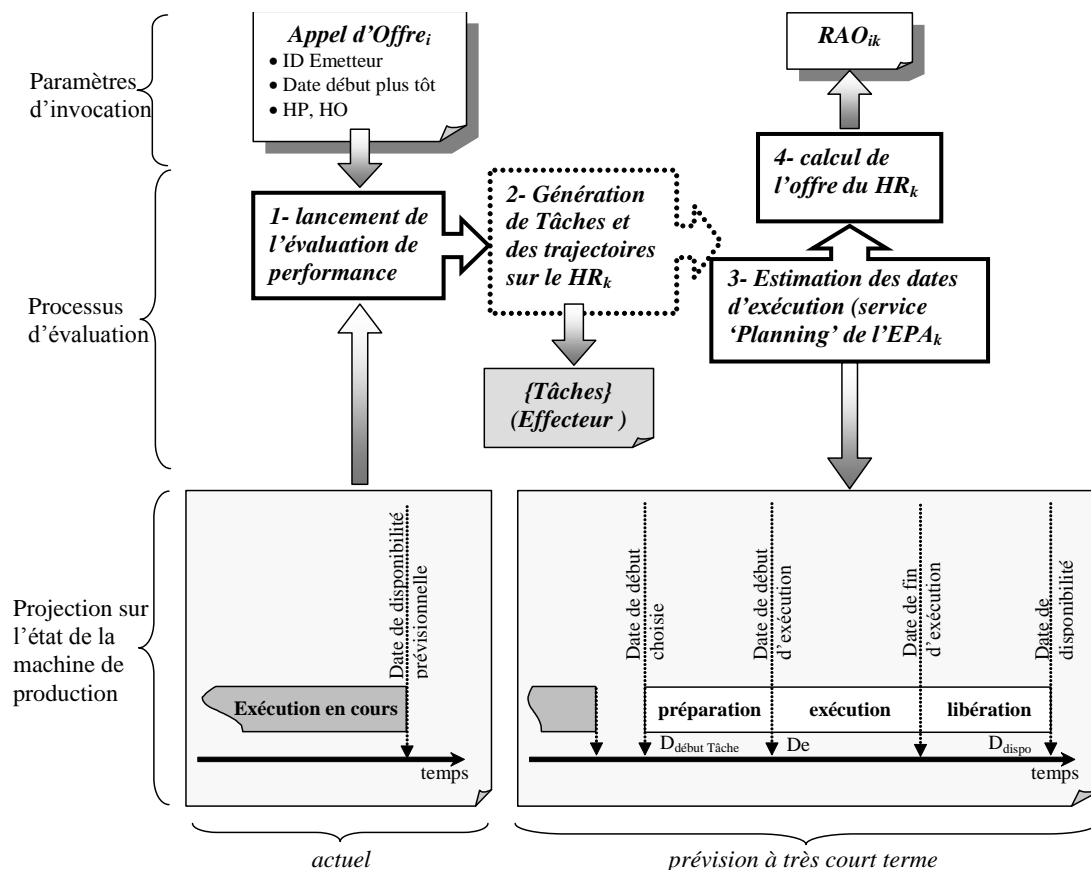


Figure 74 : Processus d'évaluation d'un Appel d'Offre AO_i par les services de l'EPA_k associés au HR_k

Si aucune réponse à l'Appel d'Offre AO_i n'est formulée, le M_produit sera par défaut dirigé vers la zone de stockage.

Une fois la ressource de destination connue, il faut organiser le transfert de la pièce. Les flux de produits à travers la cellule nécessitent des tâches de transport de ressource à ressource, *via* des ressources spécialisées dans la manipulation robotisée des produits. Ces tâches entraînent des synchronisations précises entre les ressources de transformation et celles de manipulation, plus particulièrement lors de l'échange des produits, c'est-à-dire lors des opérations de chargement-déchargement.

Dans le cas de la cellule de tournage robotisée (figure 72), pour transférer un produit $M_produit_x$ d'un tour M_tour_k au tour M_tour_z , il faut utiliser un robot portique M_robot_y . D'abord, il faut positionner en déplacement rapide le robot portique devant le tour_k, au moment où la phase de transformation sur la ressource tour_k est terminée sur le produit_x. Là, une opération de déchargement peut être lancée. A l'issue, le robot portique peut transporter en déplacement rapide le produit_x devant le tour_z, où l'opération de chargement peut être effectuée (figure 75). Bien entendu, si la ressource tour_z n'est pas disponible à l'issue de l'usinage sur le tour_k, il faut passer par l'étape d'un stockage.

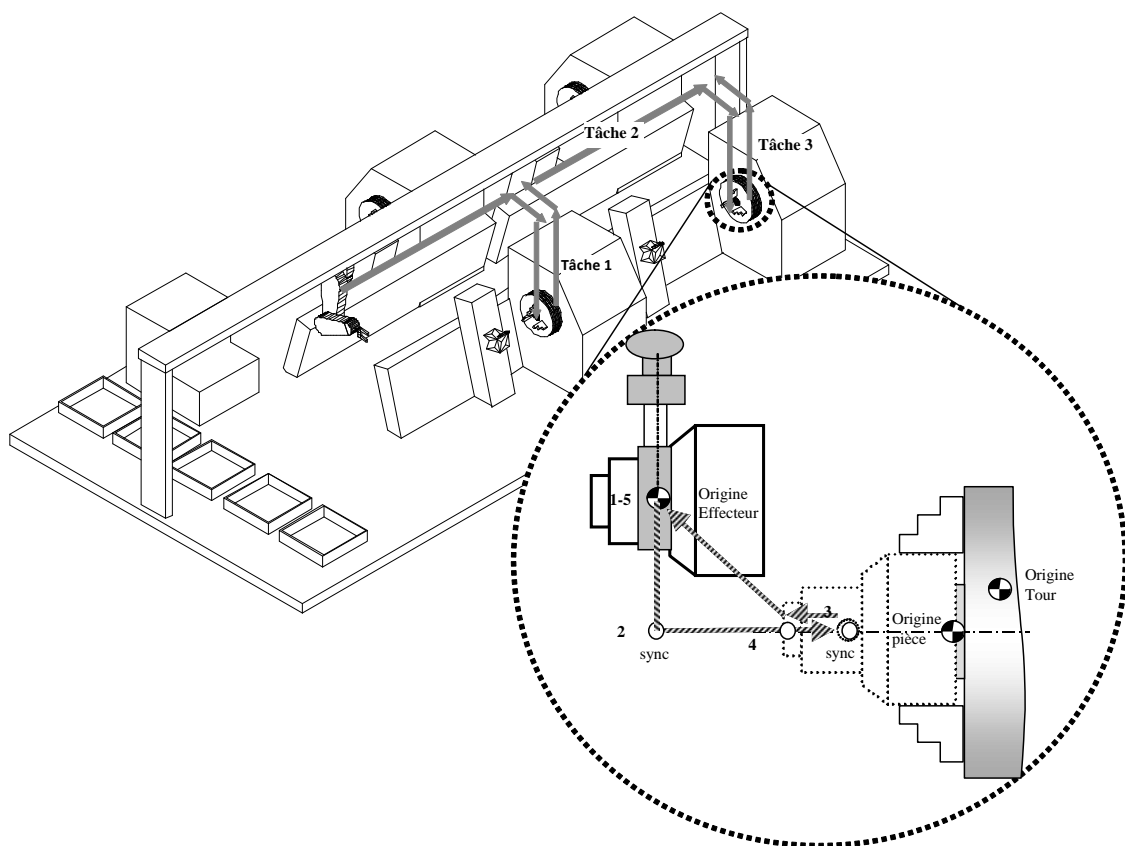


Figure 74 : Processus de transfert d'un HP_i par un robot HR_k entre deux HR_λ

Les opérations de chargement et de déchargement sont prédéfinies à partir de cycles de trajectoires paramétrées types. Le paramétrage de ce cycle est réalisé à l'aide des données issues des I_{produits} et des I_{ressources}. Par ailleurs, la synchronisation entre les deux ressources est pré établie entre les deux cycles des ressources, au travers d'un cadre de coordination. Ce cadre décrit du point de vue de chaque ressource les actions et les points de synchronisation à mettre en œuvre au travers de messages échangés.

La figure 75 donne l'exemple de la dépose d'une pièce sur un tour. Une fois le robot arrivé en position (sur le point d'accès du tour), il reste en attente d'une autorisation de celui-ci pour accéder à la zone de travail. De son côté, le tour ouvre ses mors, puis autorise le robot à accéder au mandrin. De son côté et selon le cycle de dépose, le I_{robot} génère les mouvements de son effecteur jusqu'à ce que la pièce soit en place dans le mandrin. Une fois la pièce en position, le I_{robot} prévient, via le message ID_Mes_{y1}, le I_{tour} afin de serrer

la pièce (M21). Une fois la pièce maintenue dans le mandrin, le I_tour signale au I_robot, via le message ID_Mes_{y2}, que l'effecteur du robot peut être ouvert. Le robot libère la pièce, la trajectoire du robot peut continuer et retourner en déplacement rapide jusqu'à son point d'accès au tour.

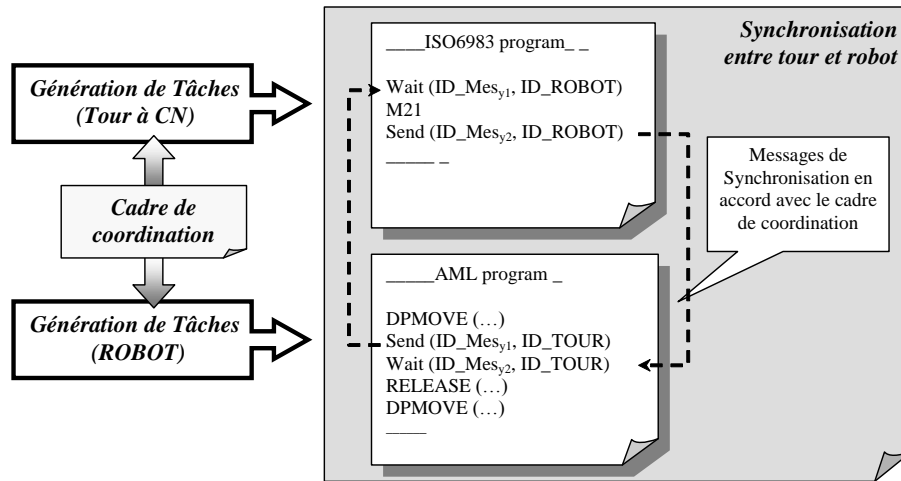


Figure 75 : Processus de transfert d'un HP_i par un robot HR_k entre deux HR_λ : synchronisation lors du dépôt sur la ressource destinataire

Pour ce problème d'affectation des tâches de transfert, l'isoarchie concernée est constituée uniquement du HP_i, du HR_λ de départ du transfert, du HR_{λ'} destinataire et de l'ensemble des robots portiques HR_k :

$$[I_{T\lambda,\lambda'}] = \{I_{\text{produit}_i}, I_{\text{tour}_{\lambda}}, I_{\text{tour}_{\lambda'}}, \{I_{\text{robot}_k}\}\}$$

• Résultats obtenus

De nombreuses expérimentations ont été réalisées sur une maquette de simulation développée en C++, où chaque EPA a été mise en œuvre *via* un ordinateur de bureau, l'ensemble des EPA communiquant au travers d'un réseau TCP-IP *via* la librairie *winsock*. L'interface homme-machine permet sur chaque EPA de visualiser graphiquement et en temps réel simulé avec un facteur d'accélération le fonctionnement des tours et l'évolution géométriques des pièces. L'évaluation de performance est réalisée de manière indépendante, par un observateur qui calcule les taux de charge des ressources et trace le diagramme de Gantt résultant du fonctionnement isoarchique de la cellule flexible de tournage.

Les capacités de flexibilité et d'auto-organisation ont été testées au travers de différents cas et jeux de données.

Dans tous les cas, une bonne réactivité du système de pilotage isoarchique, qui a continué à auto organiser la production en utilisant les ressources disponibles à leur capacité maximale, peut être notée. Cela démontre un excellent comportement, pouvant être qualifié de robuste. Au final, le système de production peut être qualifié d'agile, au sens de (Gunasekaran 2001), c'est-à-dire flexible, robuste et réactif.

Pour illustrer ces propriétés, nous allons examiner un événement extrêmement perturbant : l'introduction d'un lot urgent, qui remet en cause les engagements précédents des holons de la cellule. En effet, le service Planning d'une EPA gère la notion de priorité de tâche et traitera les pièces selon leur niveau de priorité. À l'arrivée d'un lot urgent dans la cellule de tournage, un niveau élevé de priorité sera affectée à l'AO concernant les premières étapes de son usinage et ce niveau sera préservé tout au long du processus de fabrication du lot. Cette propriété provient du fait qu'un AO contient le I_ordre, donc la date d'achèvement souhaitée.

Ce comportement peut être observé sur la figure 76, qui présente le diagramme de Gantt ressource élaboré par la maquette de simulation. La situation initiale correspond à la production d'un ensemble de HP_{pièce} en

cours de transformation. A la date 800 est introduit un $HO_{lot\ urgent4}$ de 6 $HP_{pièce}$ comportant 2 HO_{phase} par HP . Les HR_{tour} terminent les traitements en cours. La première ligne de la figure montre l'échelle des temps. Chaque tâche est repérée sur le Gantt par le triplet $[n^o_{lot}, n^o_{pièce}, n^o_{tâche}]$, écrit verticalement au droit de la date d'engagement de la tâche par la ressource.

Par définition, un $HP_{lot\ urgent}$ est prioritaire. Son introduction remet en cause tous les pré-engagements des HR_{tour} . Les AO sont évalués par les EPA après tri par ordre de priorité, puis à priorité égale, par ordre chronologique (FIFO). Les produits en phase de finition restent dirigés normalement vers les palettes de sortie, mais les autres sont dirigés vers la zone de stockage temporaire et les EPA se répartissent en négociant les $HP_{piècex}$ du $HO_{lot\ urgent4}$: 6 AO correspondant aux HO_{phase1} des $HP_{piècex}$ ont été en fait émis dès la date 800.

Suivons le parcours du $HP_{pièce1}$ [4,1,*]. À la date 900, le HR_{robot1} prend le brut du $HP_{pièce1}$ et le transporte [4,1,1] sur le HR_{tour4} . Cela signifie que c'est le HR_{tour4} qui a remporté l'AO associé à l'affectation de la première phase d'usinage de la première pièce [4,1,2].

Cela s'explique, car il s'agit de la première machine à être libérée après l'introduction du lot urgent !

Avant la fin de cette tâche, pour préparer l'affectation de la seconde phase, l'EPA du HR_{tour4} diffuse un AO : $\{HP_{pièce1}, HO_{phase2}\}$. Tous les HR_{tourx} étant déjà occupés à la production du lot urgent, c'est le $HR_{stockage}$ qui remporte l'AO, et le $HP_{pièce1}$ est temporairement placé en stockage par le HR_{robot1} .

Tout HP envoyé en stockage provoque la diffusion périodique, depuis l'EPA du stock, d'AO pour l'exécution du HO suivant le concernant. Ainsi, la reprise de la fabrication des pièces stockées s'exécute sans l'occurrence d'un processus particulier, dans l'ordre des priorités des HO associés, puis des dates de stockage des HP concernés. La durée de stockage augmente sensiblement mais progressivement la priorité, ce qui permet de sortir toutes les pièces du stock. Ainsi, le $HP_{pièce1}$ va finalement être traité par le HR_{tour3} [4,1,4], puis être lavé ($HR_{machine\ à\ laver}$) [4,1,6] et mesuré ($HR_{machine\ à\ mesurer}$) [4,1,8].

Parallèlement à ce mécanisme, nous trouvons le mécanisme d'affectation des tâches de transfert par les HR_{robot} : toute tâche de transfert fait l'objet d'un AO émis par l'EPA du HR d'où doit être évacué le produit, une fois la destination connue. Cet AO : $\{HP_{piècei}, HO_{transfertk}\}$ contient la description du HP dans son état intermédiaire, de son mode de préhension et des cycles de prise et de dépose... ainsi que la destination et la date de début probable de la tâche. C'est le HR_{robot} répondant le mieux à cet AO qui remporte l'AO : le HR peut effectuer la tâche. Ainsi dans l'exemple de la figure 76, le $HP_{pièce1}$ va être transféré par le HR_{robot1} et le HR_{robot2} , dans l'ordre HR_{robot1} [4,1,1], HR_{robot1} [4,1,3], HR_{robot2} [4,1,3bis] (sortie du stock), HR_{robot1} [4,1,5], HR_{robot1} [4,1,7] et HR_{robot2} [4,1,9].

En pratique, le fonctionnement de PROSIS montre un effet de lissage des charges sur les différents RH. En effet, un RH très performant (par exemple un tour ayant une forte puissance de broche) va être dans un premier temps plus chargé que les autres. Mais dès que son état de chargement devient trop important, cela se traduit par des attentes qui vont alors pénaliser sa performance. Les autres HR, moins performants en théorie, redeviennent alors concurrentiels et peuvent accéder à leur tour à l'affectation de tâches.

En définitive, tant que tous les HR ne travaillent pas avec un taux d'occupation satisfaisant, cela signifie que de nouveaux AO peuvent être introduits dans le système de production. Cet effet de lissage s'observe également dans la répartition de l'activité des RH_{robot} .

L'ensemble des mécanismes de décision que nous venons de décrire a été obtenu sans prise de décision prévisionnelle, sans centre de décision centralisé et sans intervention humaine. Le $HR_{cellule\ de\ tournage}$ est devenu un système de production totalement autonome, qui, à l'instar d'un holon, autogère totalement son propre fonctionnement. En effet, par la simple observation des taux de chargement des HR qui le composent et sans rien leur imposer, le $HR_{cellule\ de\ tournage}$ est capable de représenter la totalité de ses HR au sein d'une isoarchie inter-cellules, d'y affronter la concurrence et de remporter des parts d'activité.

Cette caractéristique supplémentaire vis-à-vis d'un système de production classique démontre expérimentalement l'attribut de récursivité propre au concept de holon, sur la facette la plus difficilement démontrable : l'autonomie.

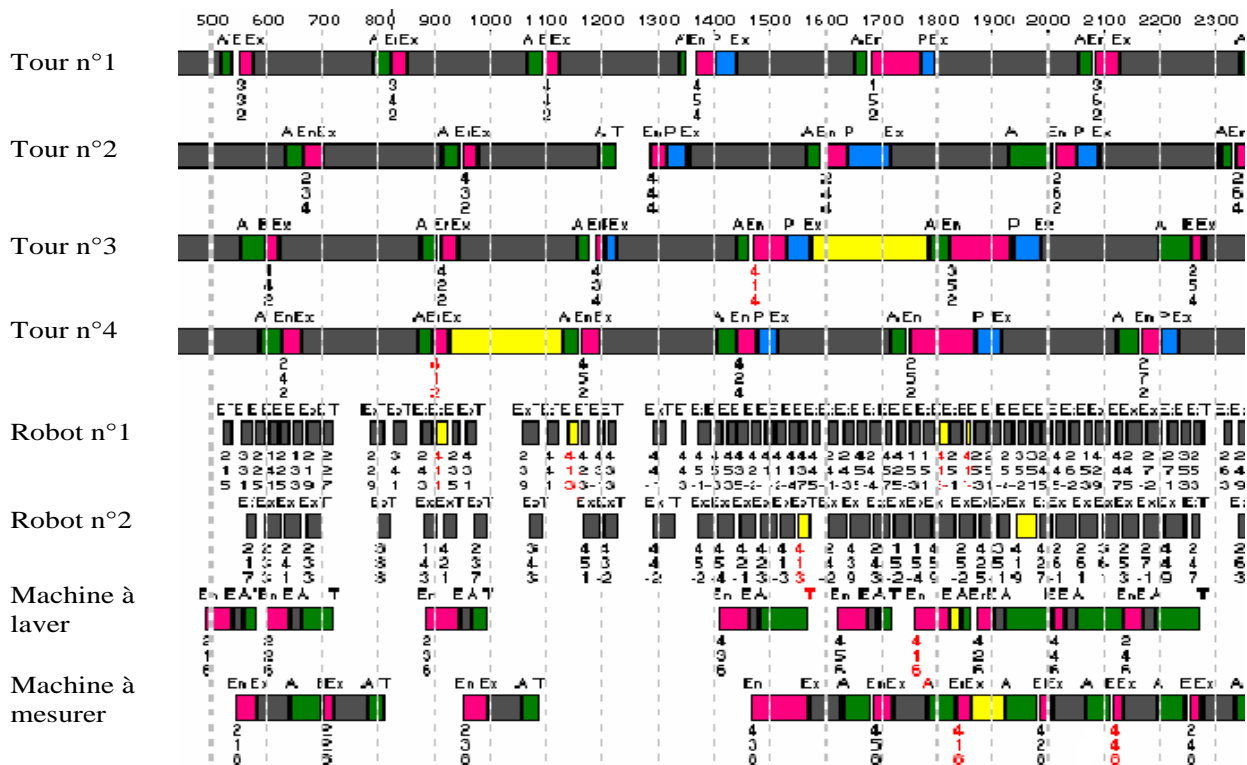


Figure 76. Gantt de suivi des opérations dans le HR_{cellule flexible de tournage} lors de l'introduction d'un lot urgent

Différentes configurations de la cellule flexible de tournage, avec plus ou moins de tours et de robots, ont été également testées sans aucune difficulté. Pour rajouter une nouvelle ressource, il suffit de lancer l'exécutable de l'EPA correspondante, en lui indiquant son nom, ses paramètres, son adresse IP... et c'est opérationnel. Ceci rajoute une dimension de flexibilité d'implantation à notre approche du pilotage, et se rapproche de la notion du 'Plug and Produce' proposée par (Arai *et al.* 2001).

L'étude de cette application a donné lieu à communications entre 1990 et 1999 dans 6 congrès avec comité de lecture ainsi qu'à la parution en 2009 d'un papier dans la revue internationale de l'IFAC '*Engineering Applications of Artificial Intelligence*'.

3.2. Pilotage isoarchique d'un Hub de triage fer-fer robotisé

- **Présentation de l'application**

Un Hub fer/fer est une gare automatisée de transbordement de conteneurs entre trains de marchandise. Un ensemble de trains porte conteneurs de diverses provenances et ayant chacun des destinations connues stationnent simultanément dans la gare. L'objectif du Hub est de transférer les conteneurs arrivant sur un train ne correspondant pas à leur destination vers un autre train se dirigeant vers cette destination. La complexité quantitative de la tâche à accomplir par le Hub exige le fonctionnement automatisé d'un tel système : il y a un grand nombre de conteneurs à transférer dans un temps relativement court, et il existe plusieurs solutions pour effectuer ces changements. La complexité qualitative de cette tâche impose un fonctionnement flexible : les conditions de transfert des conteneurs ne sont jamais identiques et il y a beaucoup de perturbations possibles.

Dans ce paragraphe, nous exposerons comment un pilotage isoarchique associé à une génération de tâche décentralisée *ad hoc* peut apporter des réponses à ces contraintes. Premièrement, nous présentons le contexte économique d'un tel système automatisé, puis nous donnerons une description de son architecture physique. Ensuite, nous détaillerons son fonctionnement, avec une description précise des contraintes à prendre en considération lors du processus décisionnel isoarchique.

Le transport intermodal peut être défini comme un mode de transport modulaire et standardisé, à l'échelle de la planète, utilisant plusieurs systèmes successifs de transport sans avoir à manipuler directement les marchandises qui sont rangées dans des conteneurs. En fait, le transport intermodal est une réponse aux problèmes de saturation des systèmes de transport. Son objectif est premièrement d'atteindre une meilleure utilisation des systèmes de transport existants et de développer ensuite la complémentarité des divers modes de transport que sont la route, le rail et les navigations fluviales et maritimes. Les échanges commerciaux intercontinentaux utilisent principalement les transports maritimes, les échanges commerciaux intracontinentaux privilégiant plutôt les transports terrestres (Forthoffer 1996).

Parmi ces derniers, le transport combiné rail/route (ou fer/route) est un transport intermodal utilisant le rail pour la partie principale du transport et la route pour le début et la fin du transport. Ce mode de transport fournit plusieurs avantages parmi lesquels nous citerons la suppression des manipulations de marchandises durant un transfert, l'économie de temps et d'argent, une sûreté meilleure des marchandises pendant le transport, une diminution notable du trafic routier et des pollutions correspondantes. Sachant que le réseau ferroviaire est constitué à l'échelle d'un pays d'un maillage de voies principales, le rôle d'un Hub de transbordement fer/fer est d'aiguiller les conteneurs lors d'un transport utilisant différents tronçons consécutifs de voies.

Un Hub de transbordement fer/fer se situe à un nœud du réseau ferroviaire. Il doit permettre l'accueil simultané de plusieurs trains, sur des voies parallèles, le temps du transbordement des conteneurs n'étant pas sur un train allant dans leur propre direction (Jalard *et al.* 1994, Bostel 1996, Bostel & Dejax 1997).

Nous allons décrire tout d'abord l'implantation générale d'un Hub fer/fer, en explicitant le rôle respectif des différents équipements robotisés qui le composent.

Les trains de marchandise arrivent sur les voies de garage à quelques minutes d'intervalle et repartiront de même : ce trafic constitue une pulsation et cela rythme l'activité du Hub. Les trains ne sont pas forcément chargés complètement, c'est-à-dire que certains d'entre eux peuvent avoir un ou quelques wagons vides.

Pour assurer le transbordement des conteneurs entre trains, nous trouvons, perpendiculairement à ces voies et circulant au-dessus, des robots portique. Ces derniers peuvent venir saisir des conteneurs, les soulever pour pouvoir les déplacer au-dessus d'un wagon libre d'un autre train où ils seront déposés.

Nous appelons travée l'ensemble des wagons situés à l'aplomb d'un même robot portique, et nous appellerons x cette direction. Chaque travée constitue donc une zone locale privilégiée d'échanges de conteneurs. Cela se fait en fonction des disponibilités des wagons correspondants et de la liste des échanges à effectuer.

Toutefois, cela peut ne pas suffire. En effet, il se peut que plusieurs conteneurs d'une même travée situés sur des wagons de trains différents aient la même destination. Or, s'il n'y a qu'un seul train qui part dans cette direction, il n'y a pas assez de place pour tous les recevoir. Il faut alors trouver une place sur ce train, mais dans une autre travée. Pour changer les conteneurs de travée, nous utilisons des robots navette, qui sont des wagons automoteurs circulant sur des voies parallèles aux trains. Cette direction de circulation des robots navette sera notée y . Une même voie de circulation de robots navette peut accueillir plusieurs robots navette. Ceci permet d'augmenter le flux de circulation entre les travées, mais pose des contraintes de non-collision entre robots navette.

Un exemple d'implantation de Hub fer-fer est représenté schématiquement selon une vue de dessus, suivant le plan (x, y) , à la figure 77 :

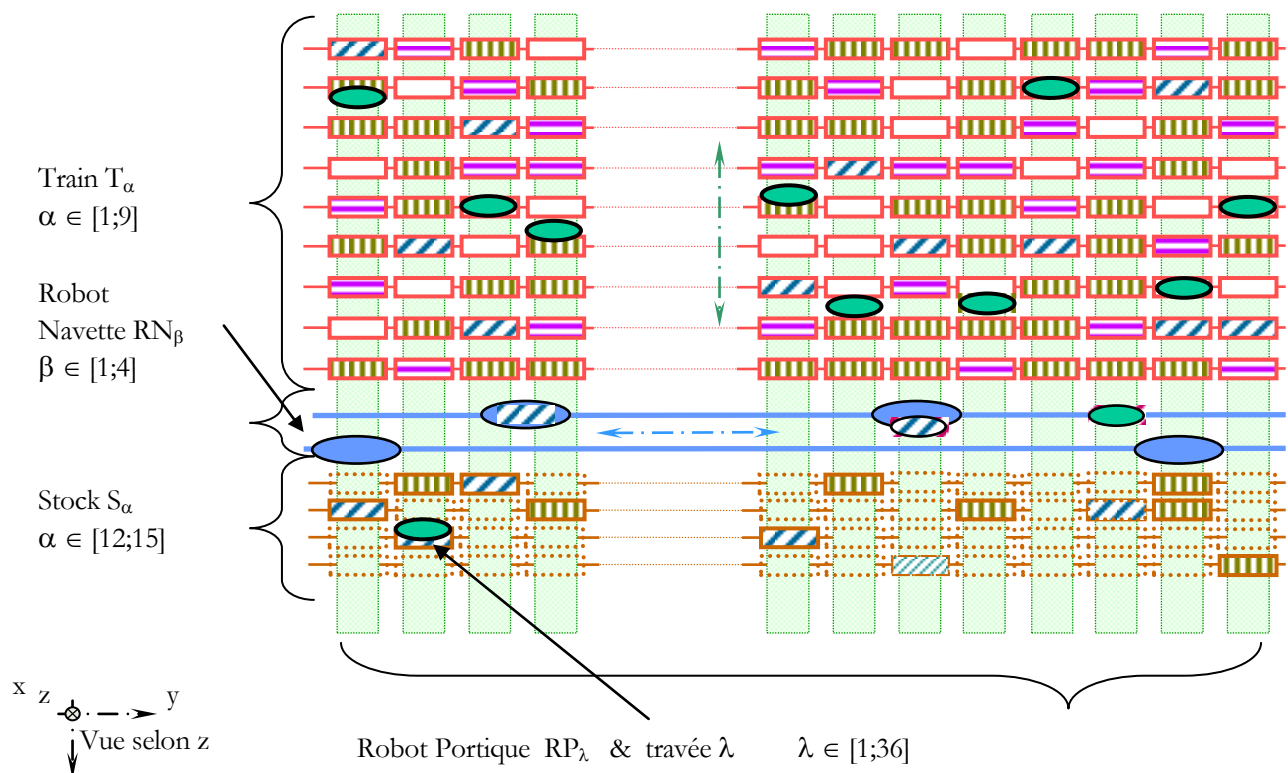


Figure 77 : Implantation physique d'un Hub fer/fer (vue de dessus)

Nous retrouvons sur ce schéma un Hub fer/fer constitué de neuf voies d'accueil pour des trains d'au maximum trente six wagons ($W\lambda\alpha$ est le wagon n° λ du train α). Deux voies accueillent quatre robots navette (RN_β) et il y a quatre emplacements de stockage par travée ($S\lambda\alpha$ est l'emplacement de stockage α de la travée λ). Cette capacité de stockage transitoire est dimensionnée en fonction des variations de destinations finales, après analyse sur une longue période des fluctuations du fret de conteneurs. Nous faisons en fait l'hypothèse que sur une période suffisamment longue, il y a autant d'entrées de conteneur dans le Hub que de sorties.

Les solutions envisagées initialement pour la gestion opérationnelle des Hub de transbordement sont fondées sur des optimisations prévisionnelles et centralisées de l'ordonnancement du mouvement des équipements et du placement initial lors du chargement des conteneurs sur les trains dans les terminaux fer/route ou fer/mer. Pour mettre en œuvre de telles solutions, un certain nombre d'hypothèses est nécessaire : le chargement initial des conteneurs sera respecté, il ne sera pas admis de perturbations sur le réseau ferroviaire et les équipements du Hub fonctionneront sans interruption de service.

Rechercher un placement initial des conteneurs sur les trains de manière à réduire les échanges dans les Hub

de transbordement est une bonne idée (Bostel 1996) dans un tel contexte idéalisé. Toutefois, cela impose des contraintes fortes dans les gares de chargement, et rien ne permet d'assurer que ces contraintes seront bien respectées, d'où des dysfonctionnements probables. De plus, compte tenu de la complexité du trafic ferroviaire, il faut envisager que certains trains puissent arriver avec du retard, voire même ne pas arriver. Cela signifie que leur ordre d'arrivée peut être quelconque, et qu'il ne faut pas forcément attendre qu'ils soient tous là pour commencer les échanges, sinon, nous risquons des blocages.

Nous voyons bien que les solutions prévisionnelles ne considèrent pas les perturbations externes. Il en est de même pour les perturbations internes (panne temporaire d'un équipement, train aiguillé sur une mauvaise voie...).

Dans ce contexte contingent, nous pensons que seul un mécanisme de pilotage isoarchique favorisant l'auto organisation est à même de pouvoir absorber toutes les perturbations possibles.

Il permet même de donner plus de flexibilité au fonctionnement du transbordement, en autorisant par exemple le début du transbordement avec une pulsation non encore complète (les échanges commencent dès les premiers trains arrivés, et les nouveaux trains arrivant rajoutent leurs données au fur et à mesure), ou encore une entrée en gare dans un ordre quelconque sur n'importe quelle voie.

Nous allons détailler le fonctionnement et les règles de décision d'un tel système.

• Modélisation PROSIS

Pour envisager l'ossature d'un système de pilotage isoarchique, la première tâche consiste à identifier les holons en interaction et leur rôle.

Ici, les Holons Produit sont bien entendu les conteneurs. Une structure d'informations complexe peut être associée à un I_conteneur, comme des informations légales, dounières... Les informations nous intéressant sont l'ID du conteneur, sa destination et sa date souhaitée de livraison.

Ensuite, chaque machine robotisée est un Holon Ressource doté de sa propre Entité de Pilotage Ambiant. En conséquence, nous obtenons une structure avec quarante EPA (quatre robots navette et trente six robots portique) reliées en réseau selon une structure décentralisée.

Dans ce contexte, nous dotons chaque EPA d'une part d'un service ambiant spécialisé de 'génération de tâches' ayant la capacité d'analyser et de définir les tâches du HR associé, de choisir ses actions au travers d'une analyse multicritère, et d'autre part de la capacité de coordonner ses décisions et ses actions avec les autres EPA *via* service d'interaction.

Enfin, la notion d'Holon Ordre est à associer aux trains. En effet, les tâches à effectuer sont des tâches de manipulation de conteneurs visant à, pour chaque conteneur affrété pour aller à la destination X, le positionner sur un train allant vers cette destination. C'est la destination vers laquelle repart chaque train entrant dans le Hub et la voie sur laquelle il se situe dans le Hub qui déterminent pour une très large part ces tâches de manipulation : nous trouvons dans les informations associées à un train la position initiale du HP_{conteneur} dans le Hub (voie et travée), qui sera la position initiale du déplacement d'un conteneur mal placé, et la destination finale du train, qui indique l'ensemble des positions finales pour ce déplacement : cela donne une description des tâches correspondant à un ordre de manipulation.

Ces holons utilisent un certain nombre de services ambiants proposés par les EPA. Par abus de langage, nous ne rappellerons pas systématiquement que les I_holons utilisent ces services offerts par les EPA et nous appellerons les holons par leur noms fonctionnel ou symbolique (ex. : HR_{RN β} = robots navette β = RN β).

Tout d'abord, nous présenterons les mécanismes d'analyse décentralisée des tâches et les différents points clefs où se situent les prises de décision. Nous verrons tout d'abord comment chaque robot portique détermine son besoin de coopération, c'est à dire comment il va être appelé à demander l'assistance des autres portiques. Ce sera le cas lorsqu'il y aura dans sa travée un conteneur 'en trop' à évacuer vers une autre travée. D'autre part, nous verrons comment il estime son potentiel de coopération, c'est-à-dire comment il va pouvoir répondre au besoin de coopération des autres robots portique en accueillant des conteneurs. Une fois la travée de destination connue, il faut déterminer quel sera le robot navette qui permettra le passage du conteneur entre les deux travées. Pour cela, un nouvel appel d'offre va être lancé et cette fois ci, ce seront les robots navette qui seront concernés.

Nous voyons bien, dès cette description succincte, qu'aucune tâche n'est prédéterminée. Ceci est fort à

propos dans un tel système où les perturbations sont nombreuses et d'origines diverses.

L'analyse du placement initial des conteneurs se fait travée par travée, dans une isoarchie *ad hoc* :

$$[I_{Travée\lambda}] = \{I_{RP\lambda}, \{I_{W\lambda\alpha}\}_{\lambda}, \{I_{S\lambda\alpha}\}_{\lambda}, \{I_{conteneur_k}\}_{\lambda}\}$$

Dans le cas d'un conteneur mal placé, quatre alternatives sont possibles :

A : déplacer le conteneur sans faire appel aux robots navette, c'est-à-dire lui trouver directement une place libre sur le train de la bonne destination dans sa propre travée,

B : trouver un emplacement libre sur le train de destination, mais dans une autre travée, et ceci fera nécessairement appel à l'utilisation d'un robot navette,

C : stocker temporairement le conteneur, car le robot portique a soit des problèmes de disponibilité immédiate de l'emplacement prévu, soit des contraintes prioritaires de synchronisation avec une autre machine,

D : stocker provisoirement le conteneur dans l'attente de la pulsation suivante, car le train de destination est plein, et il n'existe donc aucune autre solution.

L'inventaire de toutes les possibilités d'évolution du système de transbordement est composé des combinaisons de ces alternatives. La première alternative doit être favorisée, car c'est de loin la plus simple à mettre en œuvre. Néanmoins, nous constatons de fortes similitudes entre elles. En effet, la dernière alternative dérive de l'avant-dernière, avec quelques particularités supplémentaires : la durée de stockage du conteneur augmentera au moins d'une durée égale à l'intervalle de temps entre deux pulsations, ce qui augmentera la durée totale du déplacement. Pour éviter que les conteneurs dans cette situation ne restent trop longtemps dans la zone de stockage, il faudra leur affecter une priorité élevée. De même, les alternatives avec stockage peuvent être considérées comme dérivées des premières. En réalité, un emplacement de stockage joue le même rôle qu'un wagon sur une voie. La question principale est alors de savoir si la zone de stockage initiale et/ou l'emplacement de destination sont ou non dans la même travée. Nous identifions ainsi deux types de déplacement de conteneur : les manipulations internes et les transferts coopératifs.

Dans le cas d'une manipulation interne, l'emplacement d'origine (wagon ou zone de stockage) et l'emplacement de destination (wagon ou zone de stockage) sont dans la même travée. Donc, seul le robot portique de la travée d'origine du conteneur est utilisé et il effectue une simple «manipulation» d'un conteneur.

Dans le cas d'un transfert coopératif, le robot portique de la travée d'origine du conteneur ainsi que celui de sa travée de destination doivent effectuer des manipulations qui seront synchronisées avec la tâche de transfert inter travée assurée par le robot navette.

Pour chaque type de déplacement, il existe deux sous-types : les déplacements directs et indirects. Les déplacements directs ont lieu quand le conteneur est déplacé directement de son emplacement d'origine à un nouvel emplacement définitif, ce qui suppose que cet emplacement ait été libéré auparavant. Les déplacements indirects ont lieu quand le conteneur passe par la zone de stockage car le wagon de destination n'est pas encore libre.

De plus, un conteneur peut repartir dans la pulsation qui l'a amené ou rester en stockage entre deux pulsations successives. Nous retrouvons alors onze cas de déplacement de conteneurs (Pujo et Ounnar 2002) : cet inventaire spécifie les différents états d'un conteneur lors de ces déplacements, avec un graphe d'états que nous retrouvons décrits dans la figure 78, où $W\lambda\alpha$ est le wagon $n^\circ\lambda$ du train α et $S\lambda\alpha$ est l'emplacement de stockage α de la travée λ .

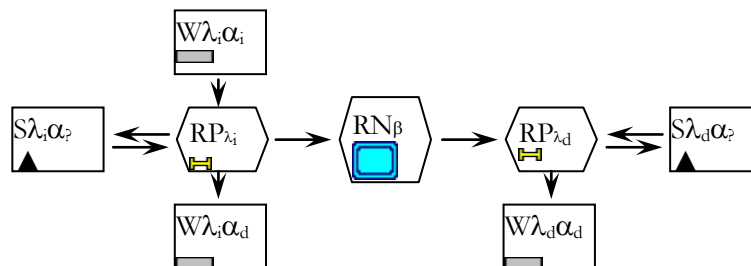


Figure 78 : Graphe d'état de localisation et de manipulation d'un conteneur.

Dans l'isoarchie $[I_{\text{Travée}\lambda}]$ du robot portique λ , il faut identifier, parmi tous les mouvements possibles de conteneurs, l'ensemble de séquences le plus intéressant, c'est-à-dire celui qui permettra au robot portique de fonctionner avec un maximum d'autonomie :

- en minimisant le nombre d'appels à des transferts coopératifs,
- en trouvant les séquences de manipulations internes enchaînées les plus longues possibles.

La figure 79 nous donne une vue transversale de la travée de ce robot portique, avec un exemple de chargement (en pointillés verts), α étant la position courante et α' la position finale de destination.

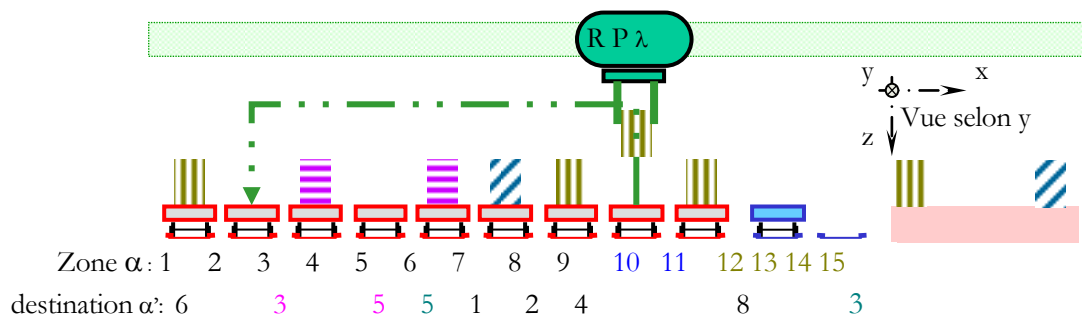


Figure 79 : vue transversale d'une travée

Dans leur état initial, les conteneurs peuvent être bien placés, mais peuvent aussi devoir changer de voie ou de travée. Ce dernier cas correspond au cas où il y a dans la travée plus de conteneurs allant dans une direction que ce qu'il y a de trains en partance pour cette direction. Il faut modéliser tous les cas possibles, sous la forme d'un graphe des déplacements nécessaires. Le service ambiant de 'génération de tâches' de l'EPA se charge de le construire par un échange de messages avec les holons mobiles de sa travée. L'analyse de ce graphe permet de déterminer la meilleure configuration de séquences possible de déplacements de conteneurs. Le traitement commence par des règles préliminaires relatives à des cas particuliers : par exemple, si deux conteneurs vont dans la même direction, mais que l'un est déjà sur le bon wagon, il n'y a alors plus d'alternative et le second doit faire l'objet d'un transfert coopératif. Ceci a pour effet de simplifier le graphe initial.

La suite consiste en un traitement du graphe de manière à trouver le plus grand enchaînement possible de déplacement de conteneurs. Nous pouvons définir trois types d'enchaînements possibles, les séquences linéaires (il faut commencer par un déplacement de conteneur vers un wagon vide, et on continue de même avec le wagon qu'on vient de vider...), les séquences bouclées (les conteneurs se remplacent mutuellement par permutations : il faut donc commencer par le déplacement indirect d'un conteneur vers le stock, temporairement, puis nous retombons dans le cas précédent qui, à la fin, se termine par le déplacement du conteneur initialement stocké vers le dernier emplacement libéré), ou des séquences plus complexes. Nous devons identifier ces enchaînements dans le graphe précédent, pour ensuite rechercher des simplifications et connaître l'ensemble des tâches à réaliser.

L'initialisation est constituée de l'analyse précédente. Les manipulations internes sélectionnées sont exécutées localement par le robot portique qui gère de façon autonome ces tâches. Les transferts coopératifs étant plus complexes à exécuter que les manipulations internes, le robot portique doit les traiter de manière prioritaire. Lorsqu'il n'exécute pas un transfert coopératif, il vérifie s'il peut exécuter une manipulation interne, et si c'est le cas l'exécute. Le choix entre les différentes tâches à réaliser est effectué *via* un service ambiant d'aide à la décision multicritère. Nous donnons ici quelques éléments sur le paramétrage de ce service :

Une première priorité réside dans l'évacuation des conteneurs en instance de transferts coopératifs. Cela se décompose de la manière suivante :

- analyse de la situation de la travée λ : il faut calculer la priorité du robot portique λ en fonction du nombre de transferts coopératifs, puis ranger les transferts coopératifs à lancer en fonction de leur propre priorité ;
- choix de la travée de destination et du robot navette : il est nécessaire de lancer un appel d'offre concernant le conteneur à transférer le plus prioritaire et de suivre la procédure d'affectation ;

- synchroniser la manipulation d'évacuation de ce conteneur avec l'arrivée du robot navette.

Une autre priorité du robot portique, encore plus fondamentale, est de chercher à accueillir des conteneurs provenant de propositions de transferts coopératifs :

- faire un inventaire des places offertes à l'accueil de conteneurs extérieurs ;
- répondre si possible aux appels d'offres et surveiller la négociation. Ceci inclut les mécanismes de recherche de la travée de destination dans le cas d'un transfert coopératif et les règles d'affectation des robots navette ;
- le moment venu, préparer le robot portique pour l'arrivée du conteneur en cours de transfert avec le robot navette.

Lors d'un transfert coopératif, deux robots doivent être choisis : le meilleur robot portique ayant un wagon libre en partance vers la destination demandée, puis un robot navette disponible, capable de gérer le transfert aussi rapidement que possible. Il est à noter que ces deux aspects fonctionnent selon le même principe d'interaction.

Pour le premier point, plusieurs travées peuvent en effet disposer d'un wagon libre se dirigeant vers la bonne destination. Comme illustré sur la figure 80, certains wagons du train de destination peuvent être libres ou encore occupés par des conteneurs devant être déplacés. Les résultats vont donc être conditionnés par l'état du train de destination à l'instant de l'appel d'offre, et par l'état de charge des différents robots qui vont intervenir.

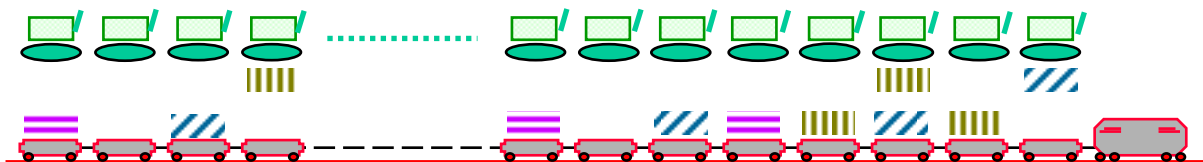


Figure 80 : vue longitudinale du Hub (plan (y, z))

L'interaction nécessaire pour cela peut se faire sur l'isoarchie minimale constituée des holons :

$$[I_{Train\alpha}] = \{ \{I_{RP_i}\}, \{I_{W_{\lambda\alpha}}\}_{\alpha}, \{I_{S_{\lambda\alpha}}\}, I_{conteneur_{demandeur}}, \{I_{conteneur_k}\}_{\alpha} \}$$

Le critère de performance est tout simplement la date d'achèvement de la tâche, ce qui favorise les échanges entre travées proches, lorsque cela est possible.

C'est au nom du $I_{conteneur}$ n'ayant pas trouvé de place dans sa travée initiale que l'EPA correspondante émet un Appel d'Offre, contenant en fait l'information suivante : «à la date t_e , un conteneur en provenance de la travée λ_e cherche un wagon libre sur le train $T\alpha_d$ ».

Ce sont les robots portiques qui répondent à cette sollicitation.

Quand un I_{robot} portique reçoit ce type d'AO, il doit vérifier dans les données des I_{holons} mobiles de sa travée s'il peut offrir un wagon en concordance avec la destination du conteneur. Si c'est le cas, il doit évaluer le temps prévisionnel qu'il leur faudrait pour recevoir ce conteneur à partir d'un robot navette. Le calcul du coût de la tâche est ici exclusivement basé sur une somme de durées (distances converties en durées en les divisant par la vitesse de déplacement des robots) : plus tôt le transfert est effectué, meilleur est le résultat. Plusieurs dates significatives sont à prendre en compte pour le calcul de ce coût, la principale étant la date potentielle de réception du conteneur par le robot portique de destination RP_{λ_d} . Chaque RP_{λ} peut alors évaluer si la réception est possible d'une façon directe ou indirecte, et le cas échéant, réserver l'emplacement correspondant soit au wagon, soit au stockage. Il existe également des cas où il y aura des attentes avant la synchronisation entre robots portique et robots navette. En définitive, la somme totale des temps correspond à l'offre émise par le service 'Interaction' de l'EPA.

Ainsi, la meilleure proposition émerge automatiquement des évaluations effectuées simultanément par les EPA de plusieurs robots portique. Après une période, limitée dans le temps, de coopération par mise en concurrence, le meilleur robot portique s'attribue la destination du conteneur.

Ce mécanisme de décision par génération réfléchie permet donc de connaître la destination du conteneur.

Par contre, il ne donne ni manière dont ce dernier sera transféré vers cette destination (c'est-à-dire quel est le robot navette qui va effectuer le transfert), ni la date de synchronisation entre le robot portique émetteur RP_e et le robot navette, ni celle entre le robot navette et le robot portique de destination RP_d .

Dès que la travée de destination est connue, il faut donc choisir le robot navette qui va s'occuper du transfert du conteneur. Pour une tâche de transfert donnée et définie par les étapes précédentes, chaque robot navette doit donc évaluer sa propre performance, afin de pouvoir la comparer avec celle des autres robots navette. Nous sommes maintenant dans la situation suivante (figure 81), avec l'isoarchie :

$$[I_{\text{Transfert}}] = \{I_{RP_e}, I_{RP_d}, \{I_{RN_i}\}, I_{W_{ca}}, I_{W_{da}}, \{I_{S_{ca}}\}, \{I_{S_{da}}\}, I_{\text{conteneur}}\}$$

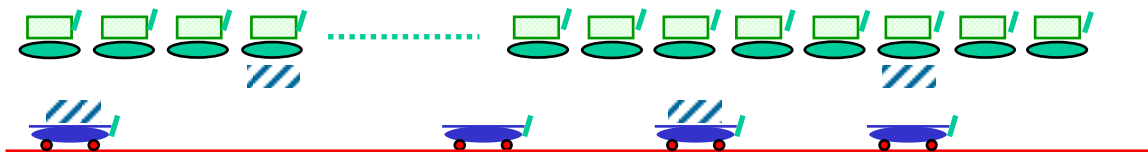


Figure 81 : vue longitudinale des robots navette du Hub (plan (y, z))

L'affectation décentralisée des tâches de transfert aux navettes est basée sur une concurrence entre les robots navette potentiellement capables de les réaliser. L'événement initial déclenchant ce mécanisme correspond à la clôture de l'appel d'offre de recherche d'une travée de destination. Le résultat obtenu et l'appel d'offre initial contiennent toutes les données de description de la tâche de transfert à exécuter : la travée d'origine, la travée de destination et le créneau horaire.

Toutes les EPA des robots navette évaluent leur propre coût d'exécution de la tâche de transfert en question. Pour cela, le processus de génération de tâches d'un robot navette consiste en une estimation de la faisabilité du transfert et des conditions dans lesquelles il sera exécuté. Ce coût dépend principalement du temps d'exécution estimé et de la qualité d'exécution des tâches précédentes. Néanmoins d'autres critères d'optimisation peuvent être inclus dans ce calcul de coût.

• Résultats obtenus

Une maquette de simulation a été réalisée, en C++ avec une communication basée sur une technologie TCP-IP et *winsock*.

Cette maquette a montré que l'enchaînement des 3 phases de décision isoarchique – analyse et pilotage interne de la travée, pilotage collaboratif inter-travée et pilotage collaboratif inter-navette – fonctionnait parfaitement et n'entraînait aucune situation de blocage.

Il est regrettable que le projet de l'étude des Hub fer-fer ait été abandonné par la SNCF, ce qui nous a empêché de nous confronter avec les résultats d'autres équipes et nous a conduits à interrompre prématurément ce travail.

L'étude de cette application a toutefois donné lieu à communications en 2001 dans 2 congrès internationaux avec comité de lecture ainsi qu'à la parution en 2001 d'un papier dans la revue '*Journal Européen des Systèmes Automatisés*'.

3.3. Pilotage isoarchique d'une flotte de robots mobiles

La question du transfert des produits au sein d'un système de production est centrale pour une entreprise qui souhaite allier flexibilité et réactivité. Pour cela, dans l'hypothèse où le transfert se fait *via* des moyens automatisés de type 'robots mobiles', l'agilité du système de transport est la clef pour atteindre un tel objectif, et cela nécessite un système de pilotage *ad hoc*. PROSIS est une solution pour atteindre de telles propriétés. Nous en posons les contours rapides avec deux applications : la gestion d'une flotte d'AGV (*Automated Guided Vehicle*) dans un atelier et la gestion d'un parking robotisé.

Dans le cas des systèmes de transport multi ressources partageant le même espace de travail, la génération des tâches à exécuter sur une ressource est fonction des tâches en cours ou prévues sur les autres ressources. Il faut donc prendre en compte le contexte d'évolution du système de production : la génération des tâches est effectuée en fonction de l'état présent de chaque ressource et de leurs tâches prévues à court terme, et doit prendre en compte d'éventuels des problèmes de collisions.

- **Présentation de l'application n°1 : un système de transport par robot mobile**

Un $HR_{\text{système de transport robotisé}}$ est constitué de HR_{AGV} (figure 82) qui vont auto-organiser les tâches de transport entre des $HR_{\text{postes de travail}}$ qui lancent les différents AO correspondant à leurs besoins (Broissin *et al.* 1996). Chaque HR_{AGV} va chercher à optimiser son déplacement pour répondre à temps à la demande et terminer la tâche le plus rapidement possible. Pour cela, le service ambiant 'Génération de Tâches' de son EPA dispose d'un modèle de tous les cheminements possibles au sein de l'atelier, sous forme d'un graphe. Ce graphe est doté d'informations sur l'occupation temporelle de chaque segment de chemin par les HR_{AGV} effectuant des AO déjà affectés. Ceci lui permet de calculer le meilleur chemin possible, et de calculer la date de livraison effective qui constitue l'expression de la performance : le HR_{AGV} le plus rapide se voit l'AO affecté et les occupations prévisionnelles de chemin sont actualisées.

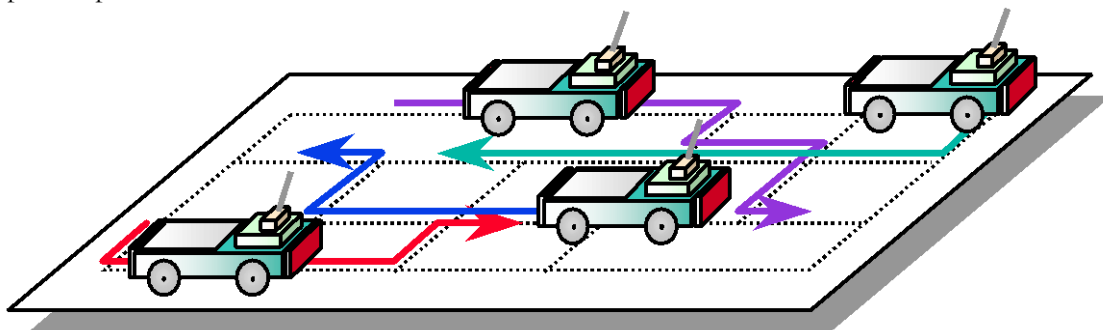


Figure 82 : Schématisation du système de transport robotisé

- **Modélisation PROSIS**

L'isoarchie est composée de $(n+p)$ HR : n I_{AGV} (robots mobiles polyvalents et identiques, utilisant une technique de suivi d'une route prédéfinie), assurant les tâches de transitique (déplacement de lots de pièces ou d'outils). L'environnement y est parfaitement connu et les p machines ou postes de chargement et de déchargement sont fixes. Les p $I_{\text{postes de travail}}$ interviennent dans l'isoarchie pour lancer les AO concernant des HO de transport décrits par le poste de départ et la date de prise en charge du (des) HP(s) transporté(s), le poste d'arrivée et la date souhaitée de livraison. Les caractéristiques du HP n'ont que peu d'importance pour notre problématique.

Par ailleurs, l'ensemble des chemins possibles est défini a priori, pour des raisons d'implantation des machines, de sécurité des opérateurs et technologies de définition des chemins (marquage au sol ou fil enfouie). Le pilotage des robots mobiles requiert de construire les trajectoires qui empruntent ces chemins. Le pilotage isoarchique d'un tel système de transport est supporté par les n EPA embarquées sur chacun des n robots mobiles. Ce système de pilotage s'intègre alors avec les autres systèmes de pilotage de l'atelier grâce au système unique de communication. En effet, dès qu'une machine ou qu'un poste de chargement

déchargement désire déclencher l'exécution d'une tâche de transitique, il appelle à son affectation à l'un des robots mobiles en diffusant comme Appel d'Offre le Holon Ordre correspondant vers chacun des robots mobiles. La mise en œuvre du système de transport depuis les postes de production de l'atelier est donc simplifiée et indépendante de la structure du système de transport (notamment indépendante de la quantité de robots mobiles et de postes de travail). Le service de Génération de Tâches de l'EPA de chaque robot mobile travaille donc à partir du triplet {poste de prise en charge, poste de dépose, date de prise en charge et/ou date de dépose}. Pour calculer une Réponse à l'Appel d'Offre, il énumère, valide et évalue toutes les trajectoires possibles du robot dans l'atelier pour accomplir la tâche de transitique correspondante et retient la plus rapide.

De nombreux travaux de recherche entrepris en robotique mobile concernent les algorithmes de recherche de trajectoires optimales dans un environnement connu ou inconnu avec ou sans obstacles mobiles ou immobiles. En général, pour les systèmes de transport robotisés utilisés dans les ateliers, la recherche d'une trajectoire optimale correspond à la recherche du chemin le plus court dans un graphe représentant le site, où les nœuds sont les points de passage et les arcs sont les chemins. Quand plusieurs véhicules utilisent les mêmes chemins, la complexité du problème de génération de trajectoires augmente. En effet, une problématique d'évitement d'obstacles mobiles apparaît dans la recherche de la trajectoire optimale. Dans ce contexte, il est nécessaire de modéliser le site et le trafic pour générer la trajectoire d'un robot mobile, en positionnant sur un même plan les trajectoires de tous les autres robots mobiles, du point de vue de l'espace et du temps (Fujimura 1995). Dans ce plan, la recherche d'une trajectoire optimale correspond à la recherche progressive d'un chemin entre les obstacles depuis un point de départ jusqu'à un point d'arrivée. Cette connaissance est locale sur chaque robot mobile et est contenue dans la structure d'information de l'environnement de la génération réflexe. Elle est mise à jour directement par les robots mobiles eux-mêmes qui diffusent leurs intentions quant ils s'engagent sur l'exécution d'une tâche. Cette information est donc reçue par les différentes EPA et prise en compte par le service 'Génération de Tâches' qui élabore les trajectoires possibles : la trajectoire d'un robot mobile peut alors être générée en fonction du contexte de l'environnement. Pour un chemin donné (ensemble de segments), une représentation de ce chemin, sous un double aspect spatial et temporel, positionne les autres robots mobiles qui empruntent également les segments qui composent le chemin en question. En dilatant ces représentations suivant une distance et une marge temporelle de sécurité, il apparaît clairement les zones d'occupation des segments par les autres robots. Toute tentative d'un robot mobile de traverser une de ces zones engendre une collision. La trajectoire du robot mobile est alors générée en projetant le point de départ à vitesse maximale de déplacement du robot mobile. En cas d'intersection avec une zone de collision, la vitesse est réduite afin d'obtenir une trajectoire tangente à la zone de collision. A chaque nouveau point d'intersection inter segment, la projection à vitesse maximale est répétée jusqu'à atteindre le point d'arrivée. Un exemple de trajectoire générée est présenté à la figure 83.

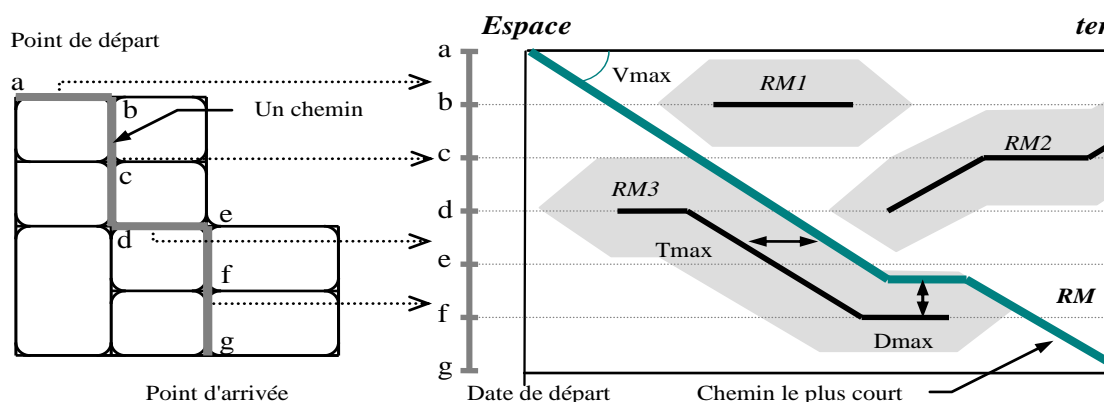


Figure 83 : Exemple d'une trajectoire optimale

Grâce à la génération d'une trajectoire optimale du robot mobile dans l'atelier, il est possible de calculer un indicateur représentatif de sa performance pour l'exécution d'une tâche de transport donnée. Cet indicateur

est alors utilisé par le service 'Interaction' pour faire émerger le robot mobile le plus performant pour l'exécution de cette tâche. Cet indicateur peut par exemple qualifier le robot mobile le plus rapide (il correspondra alors directement à la date de dépose prévisionnelle), ou le robot mobile qui respecte le plus les dates de prise en charge et/ou de dépose.

• Présentation de l'application n°2 : un système de stockage par robot mobile

Au cœur des grands centres urbains, il y a peu de sites pour implanter des parkings à voitures. De plus, les parkings classiques, où l'automobiliste conduit lui-même son véhicule à la place de garage, génèrent potentiellement de l'insécurité : vols, agression...

Une réponse peut venir de l'implantation dans les centres villes de parkings robotisés, où les usagers ne pénètrent plus directement et qui, à volume égal, peuvent stocker jusqu'à deux fois plus de véhicules (les places sont plus étroites, les étages moins hauts et les espaces de circulation nécessitent moins de surfaces) (figure 84) :

- l'architecture de ce type de parking est structurée autour d'allées centrales de circulation de robots mobiles,
- de part et d'autre de ces allées se situent les zones de stockage, décomposée en places pouvant contenir chacune un véhicule à stocker,
- sur un même étage, la zone de stockage est composée de deux rangées de places,
- plusieurs plans de stockage sont superposables, en aérien (immeuble) et/ou en invisible (parking souterrain),
- l'accès à chaque place se fait grâce à un robot mobile, transportant le véhicule selon la direction x et circulant entre les deux rangées de places,
- le passage d'un étage à un autre se fait grâce à des élévateurs (direction z) disposés à chaque extrémité des allées,
- des sas d'Entrée/Sortie sont situés au niveau de la rue et permettent le chargement et le déchargement des robots mobiles, c'est-à-dire le dépôt et la récupération des véhicules par leurs usagers.

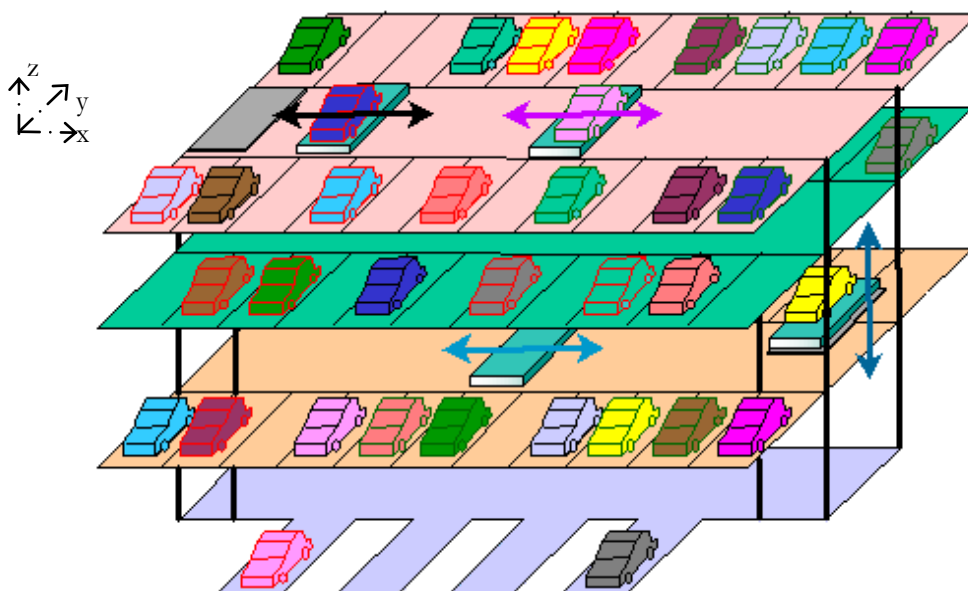


Figure 84 : Vue schématique d'un parking robotisé

Chaque robot mobile doit assurer les fonctions suivantes :

- translater dans les allées, pouvoir se positionner devant les places et entrer/sortir des robots élévateur,
- prendre ou déposer un véhicule dans une place ou un sas, indépendamment de ses dimensions et autres caractéristiques.

Un robot mobile est constitué de deux parties :

- un chariot porteur assure la circulation dans les allées et l'accès dans les élévateurs (mouvement selon l'axe x) ; ce dernier permet le positionnement fin d'un ensemble 'chariot navette & véhicule' en face des places de stationnement.
- un chariot navette assure la préhension du véhicule et peut se détacher du chariot porteur pour pénétrer dans une place et y prendre/déposer le véhicule (mouvement selon l'axe y).

Un parking robotisé est composé de HR_{sas} d'entrée-sortie, où des $HP_{véhicule}$ sont laissés ou récupérés par les clients (ce qui engendre des HO) et de n $HR_{robot\ mobile}$ qui les transfèrent entre des places de stockage. Ces places étant réparties sur plusieurs étages, les $HR_{robot\ mobile}$ empruntent des $HR_{robot\ élévateur}$.

Une description des règles de décision dans ce système est donnée dans (Pujo *et al.* 2006).

Là encore, nous avons deux phases décisionnelles : des $HR_{robot\ mobile}$ se distribuent les tâches de transport des $HP_{véhicule}$, en recherchant les chemins les plus rapides possibles pour offrir la meilleure qualité de service possible aux clients, et des $HR_{robot\ élévateur}$, qui sont au service des précédents pour assurer les changements d'étage, selon les techniques d'analyse et de recherche de chemins similaires à celles évoquées en figure 83.

Les HO correspondant aux restitutions de $HP_{véhicule}$ aux clients sont prioritaires. Ils sont lancés dans l'ordre d'arrivée des clients.

Cela n'implique pas que les véhicules soient restitués dans cet ordre : tout dépend de la place où il faut aller chercher le véhicule et des positions relatives des $HR_{robot\ mobile}$ et $HR_{robot\ élévateur}$ dans le parking.

Pour les stockages, si le taux d'utilisation du parking est élevé, les solutions de stockage les plus rapides seront privilégiées, alors que si la charge est faible, des solutions répartissant les véhicules dans le parking seront préférables.

Chaque HR est associé à une EPA. Le fonctionnement du système de pilotage s'appuie essentiellement sur les services ambiants 'Interaction' et 'Génération de Tâches'. C'est cette dernière qui nécessite d'être décrite maintenant. Nous nous focaliserons sur le fonctionnement des $HR_{robot\ mobile}$, qui est ici le plus complexe.

Chaque $I_{robot\ mobile}$ doit générer ses trajectoires tout seul.

Pour cela, il dispose d'une structure de données représentant le parking, de la dernière position connue des autres machines, de leur plan prévisionnel de mouvement pour les tâches en cours.

A l'instant t où il reçoit l'AO de dépôt ou de récupération, il doit rechercher le meilleur chemin possible.

Il doit donc être devant le point de départ du transport le plus rapidement possible, puis il doit ensuite atteindre le point d'arrivée le plus vite possible, pour être de nouveau disponible pour une nouvelle mission.

L'architecture particulière du parking (un élévateur à chaque extrémité des allées) fait que le nombre de chemins possibles n'est pas trop élevé.

Malheureusement, ces chemins sont partagés par plusieurs robots mobiles, qui constituent autant d'obstacles mobiles à éviter. Toutefois, ces obstacles sont temporaires, et il peut donc convenir de s'arrêter le temps qu'ils disparaissent.

Ensuite, ces chemins passent par les Robots Élévateur, ce qui nécessite des synchronisations et donc là aussi des attentes.

Le chemin emprunté par le $M_{robot\ mobile}$ doit donc être associé à sa composante temporelle pour former la trajectoire du robot mobile.

La date d'arrivée constitue la performance de cette solution : la trajectoire choisie sera celle dont la date de fin sera la plus tôt.

En définitive, chaque $I_{robot\ mobile}$ va tester et évaluer toutes les solutions le concernant, et retenir la meilleure. Il comparera ensuite, via le protocole d'interaction du service ambiant fourni par l'EPA, cette performance avec celles obtenues par les autres robots mobiles. Le robot mobile le plus efficient sera retenu.

- **Résultats obtenus**

Une maquette de simulation monoposte a été réalisée, en C++ avec une communication basée sur des échanges directs de messages entre objets. La configuration du parking ainsi testé sur cette maquette permet de faire varier le nombre de robots mobiles, le nombre d'étages, le nombre de places par étage ainsi que le nombre de véhicules par place.

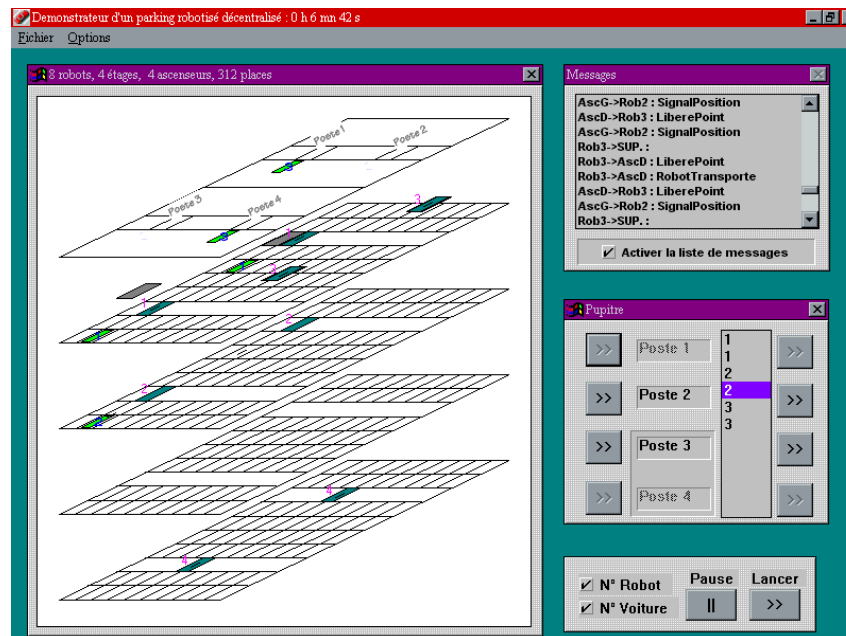


Figure 85 : Interface graphique de la maquette de simulation

Nous avons pu ainsi vérifier les algorithmes de génération de trajectoires des robots mobiles et les mécanismes de coordination entre robot mobiles, élévateur et poste E/S.

Cette maquette a montré que l'enchaînement des 2 phases de décision isoarchique – recherche du robot mobile ad hoc puis synchronisation avec le robot élévateur – fonctionnait parfaitement.

Le test sur de longues durées, avec une génération automatique et aléatoire des mouvements d'entrées-sorties dans le parking, n'a pas permis d'observer de situation de blocage.

Enfin, la mise en œuvre du système de stockage en simulation nous a permis d'identifier plusieurs éléments pouvant être intégrés au niveau de la génération de tâches, et ainsi d'améliorer ainsi la gestion du système de stockage. Tout d'abord, la position d'attente des robots mobiles est importante puisqu'elle détermine le temps que ceux-ci consomment avant de débiter réellement l'exécution de la tâche. Il est donc judicieux de les positionner en temps masqué près des postes E/S en cas de forte demande d'entrée de produit ou inversement plus près des produits en cas de fortes demandes de sortie. De même, il est nécessaire de déterminer une stratégie de remplissage des alvéoles. Remplir les alvéoles dans l'ordre (par niveau) génère beaucoup de conflits entre robots mobiles désirant accéder à un même niveau. Une meilleure solution consiste à répartir uniformément les produits dans tous les plans de stockage, ce qui limite considérablement les occurrences de collisions.

Enfin, l'évaluation du nombre de robots mobiles à mettre en œuvre pour un niveau de charge donné permettrait de reconfigurer en-ligne le système de stockage et ainsi de dégager du temps pour, par exemple, des actions de maintenance préventive des robots mobiles.

L'étude de cette application a donné lieu à communications en 2001 dans 1 congrès international avec comité de lecture ainsi qu'à la parution en 2005 d'un papier dans la revue *'Journal international of Automation - Austria'*.

3.4. Pilotage isoarchique d'un réseau partenarial logistique

Les chaînes logistiques actuelles sont généralement construites à partir d'un graphe de relations contractuelles figées, au sens où :

- chaque client définit pour chaque affaire sa propre liste de fournisseurs auprès desquels il répartit ses lancements de commandes de manière à minimiser ses propres risques,
- les fournisseurs connaissent la liste de leurs clients, ils sont au courant par avance des commandes théoriquement à venir et ont intérêt à privilégier leurs gros clients.

Autrement dit, la relation Clients/Fournisseurs est définie selon un contrat commercial bilatéral précis, avec des engagements réciproques (Clients ou fournisseurs) sur des volumes et/ou des périodes et/ou des délais... qui masquent des intérêts divergents.

Dès lors, les clients sont contraints par leurs fournisseurs et vice versa : la dynamique d'une chaîne logistique est très faible : dans un tel fonctionnement, la dégradation de la relation entre deux maillons de la chaîne logistique, suite à une perturbation locale, peut être l'origine de dysfonctionnements conséquents en amont comme en aval sur la chaîne logistique. A titre d'exemple, nous citerons la situation d'un fournisseur face à une quantité supplémentaire commandée par son client ou vice versa, ou celle d'un client qui voit arriver sa commande avec un retard imprévu. Tous sont potentiellement en difficulté vis-à-vis de leurs autres partenaires.

L'effet '*BullWhip*' est une des expressions de l'effet cumulé de ce type de problèmes.

Cela met en évidence la fragilité des relations liant les différents partenaires de la chaîne logistique. Ceci est la conséquence d'un comportement opportuniste de la plupart des partenaires d'une chaîne logistique qui est basée sur la juxtaposition de relations bilatérales.

• Présentation de l'application

Depuis quelques années, nous assistons à une forte évolution des relations clients-fournisseurs afin d'obtenir d'une part une meilleure gestion interne de chaque partenaire et d'autre part une meilleure performance globale en réponse au client final.

Nous proposons une nouvelle approche des relations entre entreprises, qualifiée de 'réseau partenarial logistique' (RPL). Au sein d'un réseau partenarial logistique, les partenaires (Clients & Fournisseurs), communiquant sur un même medium de communication, négocient pour répondre au mieux aux attentes des clients, autrement dit, aux appels d'offre lancés par ceux-ci sur le réseau, et pour exploiter au mieux les capacités des fournisseurs (figure 86). Une entreprise \square , appartenant à un réseau partenarial logistique composé d'un ensemble de n entreprises partenaires, peut être fournisseur de p partenaires, client de q partenaires et concurrents de r partenaires, avec $p+q+r \leq n$.

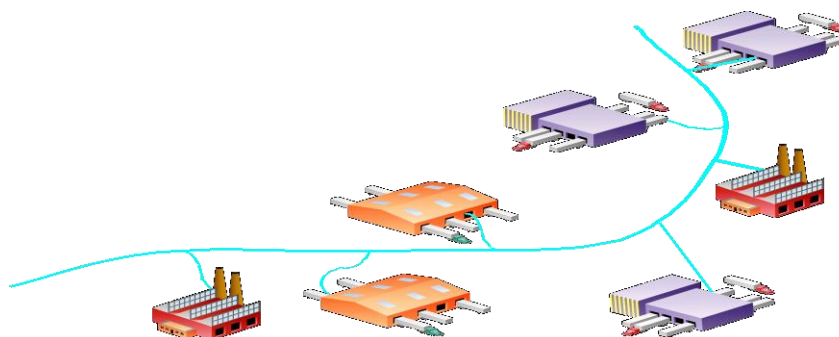


Figure 86 : Réseau partenarial logistique

Dans ce cadre, chacun des partenaires participe à l'atteinte d'un objectif commun qui est d'assurer

collectivement la répartition des ordres venant des différents clients tout en respectant les intérêts et les capacités de chacun des partenaires au sein d'une transparence saine et transparente, visant à assurer une excellente qualité de service au client final.

Ceci induit une grande dynamique du fait que l'organisation des flux découle uniquement de relations de coordination et de coopération existant temporairement entre les partenaires : ce qui optimum à un instant donné ne l'est pas forcément plus tard et doit donc être réévalué. Il y aura donc auto-organisation des flux entre les partenaires du RPL

Bref, nous pourrions dire, de façon imagée, que cela revient à construire une chaîne logistique à chaque fois qu'il y a une commande à réaliser : autrement dit, il n'y a rien de prévu à l'avance.

• Modélisation PROSIS

Dans cette perspective, PROSIS offre un cadre formel pour proposer une approche de pilotage auto-organisée des relations Clients/Fournisseurs basée sur une architecture holonique et une structure isoarchique.

L'ensemble des entreprises partenaires d'un réseau partenarial logistique (Clients & Fournisseurs) sont des Holons Ressources, qui peuvent être spécialisées en HR_{client} , en $HR_{fournisseur}$, ou en $HR_{client\&fournisseur}$.

Le système de pilotage d'un réseau partenarial logistique fonctionne selon l'isoarchie suivante :

$$[IRPL] = \{ \{HR_{client}\}, \{HR_{fournisseur}\}, \{HR_{client\&fournisseur}\}, \{HP\}, \{HO\} \}$$

Dans le RPL, les clients (HR_{client} & $HR_{client\&fournisseur}$) lancent des Appels d'Offres concernant les approvisionnements immédiatement nécessaires, les fournisseurs potentiels (HR_{client} & $HR_{client\&fournisseur}$) rentrent en phase de négociation pour répondre aux Appels d'Offres, et la meilleure réponse pour chaque AO émergera via ce système isoarchique de pilotage.

Une EPA est associée à chacune de ces entreprises. Cette EPA est dotée de services d'Interaction, d'Optimisation et de Planning permettant d'une part l'autoévaluation face à un AO et d'autre part l'interaction pour pouvoir participer à la négociation. Ces services opèrent en association avec le système de production, ce qui permet à l'entreprise de devenir une entité intelligente, c'est-à-dire un $HR_{entreprise}$ capable de fonctionner avec d'autres $HR_{entreprise}$ en auto organisation : le but commun de rechercher la meilleure réponse à chaque Appel d'Offre lancé au préalable sur le réseau.

Chaque Appel d'Offre émis *via* le service *ad hoc* d'une EPA associée à un $HR_{entreprise}$ sera muni d'informations telles que le nom de ce $HR_{entreprise}$ émetteur, la description du travail à effectuer sur le Holon Produit (états initial et final, gamme...) selon les indications du HO associé (quantité désirée, date de fin de négociation (date à laquelle la décision doit être effective), délai de livraison...). Toutes les EPA connectées au RPL vont réceptionner cet AO, et ceci crée le processus de recherche de la meilleure solution possible. Cette recherche étant lancée simultanément sur toutes les EPA, la solution retenue sera obtenue par émergence, en choisissant la meilleure solution connue à la date de fin de négociation.

Le processus d'émergence se déroule sur chaque EPA en 2 phases :

- dans la première, il s'agit de faire un classement des différents AO reçus selon plusieurs critères paramétrés à façon par l'entreprise : ceci lui permet de mettre en évidence l'ordre décroissant des AO pour lesquels elle est la plus performante ou/et qui lui sont potentiellement le plus profitable,
- dans la seconde, il s'agit de concourir dans la négociation inter-holonique pour essayer de gagner ces AO, en privilégiant les mieux classés. Pour cela, il faut calculer la performance de l'entreprise vis-à-vis de ces AO, dans l'ordre du classement, en faisant l'hypothèse que tout AO mieux classé et engageable va être pré engagé. Lorsque la charge de l'entreprise atteint sa capacité maximale, elle cesse de concourir.

Détaillons ces deux phases, en commençant par le classement.

Une fois l'AO reçu par une EPA donnée, le service 'Interaction' va vérifier la faisabilité de l'AO en termes de métier requis, puis procède à la transmission des caractéristiques de l'AO au service 'Optimisation'. Ce dernier permettra d'obtenir un classement de tous les AO reçus, selon la capacité du système de production

de l'entreprise associée à l'EPA et selon des critères stratégiques configurés par l'entreprise.

L'évaluation d'un AO reçu s'effectue via le service d'aide à la décision multicritère de l'EPA, dans le but d'obtenir un classement de tous les appels d'offre reçus. L'ensemble de critères retenus peut être de nature qualitative ou quantitative. Parmi les critères quantitatifs figure la notion du temps, qui se traduit par la date de réalisation prévue de cet appel d'offre au niveau du système de production. Cette donnée dépend de l'état du planning de charge de l'entreprise et de la disponibilité de ses équipements : elle est obtenue via le service 'Planning'.

A ce sujet, chaque EPA a, par définition, des échanges privilégiés avec le Holon Ressource auquel elle est associée. Ici, un $HR_{entreprise}$ fournit par exemple des informations sur son planning prévisionnel, sa capacité, sa capacité...

Les critères et indicateurs associés choisis pour cette décision multicritère sont représentés à la figure 87 :

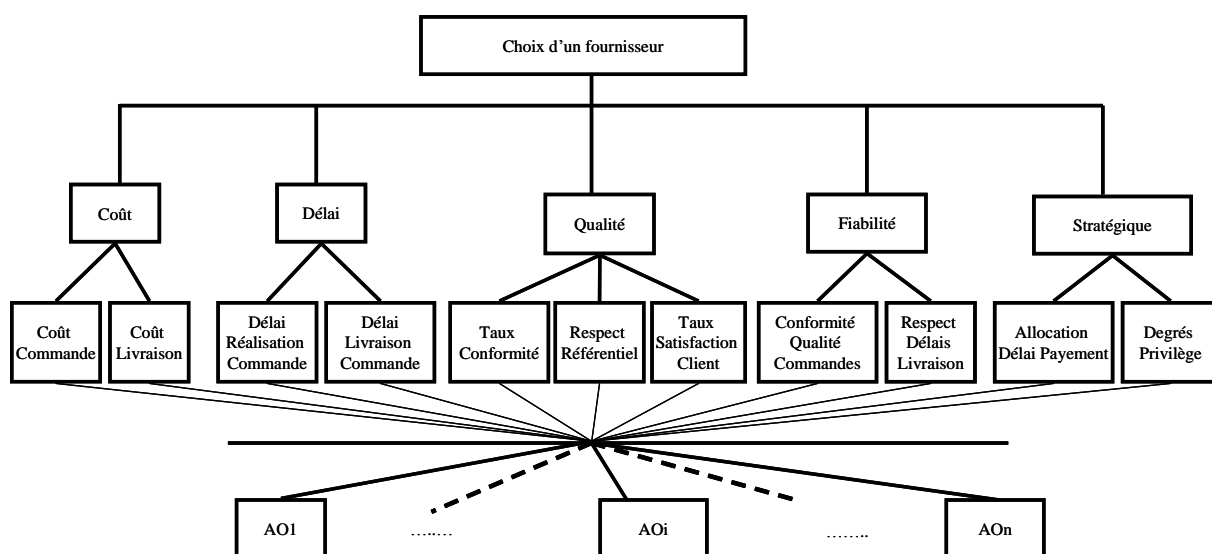


Figure 87 : Modèle AHP pour l'interclassement d'AO inter $HR_{entreprise}$

Les définitions de ces critères et indicateurs sont les suivantes :

Critère Coût " C_1 " : L'objectif de ce critère est de livrer le client au meilleur prix. Le critère coût qui est de nature quantitative se décompose en deux indicateurs :

Coût de la commande " I_{11} " : I_{11} est une évaluation quantitative du prix d'acquisition de la commande hors taxe, en excluant le coût de la livraison de celle-ci. Ce coût peut être composé du coût de la matière première, du coût horaire, du coût des consommables, de l'amortissement des stocks d'encours, etc....

Coût de livraison de la commande " I_{12} " : I_{12} est une évaluation quantitative du prix hors taxe de la livraison de la commande.

Critère Délai " C_2 " : L'objectif de ce critère est de livrer le client dans les meilleurs délais. Le délai est le temps qui s'écoule entre l'expression d'un besoin par le client et la satisfaction effective de ce besoin.

Date de réalisation " I_{21} " : I_{21} est une évaluation quantitative de la date à laquelle la commande sera prête.

Délai de livraison " I_{22} " : I_{22} est une évaluation quantitative du délai de transfert ou d'expédition de la commande du fournisseur au client.

Critère Qualité " C_3 " : Ce critère vise à garantir que les produits livrés sont de qualité et qu'ils sont conformes aux spécifications. Les indicateurs de ce critère peuvent être de nature quantitative ou qualitative et visent à décrire la continuité du service, la conformité aux règles et aux attentes du produit.

Taux de conformité " I_{31} " : I_{31} est une évaluation quantitative du ratio exprimant le nombre de produits fabriqués sans défaut et qui sont conformes aux spécifications du client, sur le nombre total de produits fabriqués.

Respect d'un référentiel " I_{32} " : I_{32} est une évaluation qualitative de la performance technique, du respect des

normes par le produit ainsi que le niveau d'assurance qualité du fournisseur

Taux de satisfaction client "I₃₃" : I₃₃ est une évaluation quantitative du nombre de livraisons effectuées par le client à son fournisseur avec une qualité du service rendu. Il s'agit d'un ratio exprimant le nombre de livraisons non retournées sur le nombre total de livraisons effectuées.

Critère Fiabilité "C₄" : Ce critère vise à garantir que les produits livrés sont fiables, mais on évalue aussi à l'aide de ce critère la capacité de l'entreprise à livrer le produit dans les délais convenus. Pour cela, nous évaluons les délais et l'exactitude des livraisons, c'est à dire l'efficacité de la gestion des commandes.

Conformité en quantité des commandes "I₄₁" : I₄₁ est une évaluation quantitative du nombre de commandes livrées à temps en bonne quantité. Il s'agit d'un ratio, basé sur l'historique des livraisons, exprimant le nombre de livraisons effectuées en bonne quantité, sur le nombre total de livraisons.

Respect des délais de livraison "I₄₂" : I₄₂ est une évaluation quantitative du nombre de livraisons complètes effectuées dans les délais. Il s'agit d'un ratio, basé sur l'historique des livraisons, exprimant le nombre de livraisons effectuées dans les temps sur le nombre total de livraisons.

Critère Stratégique "C₅" : Ce critère permet de prendre en compte un aspect qualitatif de la relation entre le client et les fournisseurs, tel que l'ordre de préférence entre les fournisseurs (pour des raisons de relation privilégiées liant le client et le fournisseur, et/ou pour des raisons concurrentielles, ...).

Allocation d'un délai de paiement "I₅₁" : I₅₁ est une évaluation qualitative du délai de paiement accordé au fournisseur. Ce délai peut être différent d'un fournisseur à l'autre. Il s'agit d'un avantage financier important.

Degré de privilège "I₅₂" : Il s'agit de l'évaluation qualitative de la relation privilégiée ou concurrentielle qu'il existe entre client et/ou fournisseur

Une fois que le classement des AO effectué, il s'agit ensuite d'évaluer la performance des premiers d'entre eux. Pour une totale transparence et une grande équité du RPL, ce calcul se fait sur toutes les EPA participantes en utilisant le même modèle d'élaboration.

Pour cela, nous nous sommes basés sur l'étude de la classe de méthodes élémentaires, qui sont souvent mises en œuvre dans la pratique (Vincke 1989). De façon générale dans ces méthodes, le décideur procède d'abord à l'association d'un poids " p_c " à chaque critère. Ce poids représente l'importance relative des critères. Par la suite, le décideur associe une note à chaque action vis-à-vis de chaque critère notée " p_{ac} ". La note finale de chaque action " F_a " par rapport à " n " critères, se calcule souvent comme suit :

$$F_a = \sum_{c=1}^n (p_c)(p_{ac})$$

L'étude complète de ces méthodes a été présentée dans (Ounnar *et al.* 2009)

La méthode choisie permet la prise en compte des critères qualitatifs et quantitatifs, s'appuie sur l'ensemble des critères utilisés dans l'étude sans en exclure aucun et renvoie comme un seul résultat, et non plusieurs.

Nous avons considéré les cinq critères utilisés dans l'évaluation comme les coordonnées d'un élément de \mathfrak{R}^5 (\mathfrak{R} -espace vectoriel de dimension finie 5). Dans le but d'éliminer le problème de monotonie et de pouvoir pénaliser un fournisseur, une note a été attribuée aux indicateurs dans le but de discriminer, à terme, suffisamment bien les différentes performances des fournisseurs sur les critères choisis de la même manière.

L'évaluation de la performance est donc basée sur trois principaux points :

- le respect des échelles entre les indicateurs,
- la cohérence de l'échelle entre les critères,
- la mise en œuvre des coefficients k1 et k2 afin de pouvoir éventuellement pénaliser le fournisseur.

La performance d'un fournisseur par rapport à un AO est donc calculée par :

$$\|P_{locale}\| = \sqrt{\left[p_1 \times k_1\right]^2 + \left[p_2 \times k_2\right]^2 + \left[p_3 \left(\frac{I_{31} + \frac{I_{32}}{9} + I_{33}}{3}\right)\right]^2 + \left[p_4 \left(\frac{I_{41} + I_{42}}{2}\right)\right]^2 + \left[p_5 \left(\frac{\frac{I_{51}}{9} + \frac{I_{52}}{9}}{2}\right)\right]^2}$$

avec :

p1, p2, p3, p4 et p5 : des constantes permettant aux clients de pouvoir privilégier un critère par rapport aux autres, en leur affectant un poids respectif dont la somme est égale à "1".

Le coefficient k_1 est déterminé par : $k_1 = \frac{\text{Coût_souhaité}}{\text{Coût_possible}}$; le «Coût_souhaité» correspond au coût que le client est en mesure d'accepter et le «Coût_possible» reflète le coût que le fournisseur propose au client (I11+I12).

Ce coefficient k_1 est égal à 1 si le coût possible est inférieur au coût souhaité par le client. Pour décrire ce calcul, établissons l'algorithme suivant :

Si Coût_souhaité < Coût_possible

Alors $k_1 = \frac{\text{Coût_souhaité}}{\text{Coût_possible}}$

Sinon $k_1 = 1$

Comme pour le critère C1, un coefficient k_2 a été introduit pour le critère C2. L'objectif était de pénaliser un «mauvais» fournisseur proportionnellement à l'écart existant entre ses prestations et les attentes du client.

L'algorithme suivant permet de traiter cela :

Si Date_souhaitée < Date_possible (avec : Date possible = I21+I22)

Alors $k_2 = \frac{\text{Date_souhaitée}}{\text{Date_possible}}$

Sinon $k_2 = 1$

• Résultats obtenus

Le travail décrit ci-dessus a été implémenté en langage Java sous forme d'une maquette de simulation distribuée utilisant l'architecture HLA (*High Level Architecture*).

L'architecture de haut niveau (HLA) développée par le département de la défense des États-Unis définit une approche pour intégrer des composants de simulation dans un système de simulation distribuée. Elle facilite l'interopérabilité et la réutilisation des simulateurs. La réutilisation signifie que les modèles de composants de simulation peuvent être réutilisés dans différentes applications de simulation sans besoin de recodage. L'interopérabilité implique la capacité de combiner des composants de simulation sur des plateformes réparties de différents types.

Une fédération HLA désigne un système de simulation distribué faisant intervenir un ensemble de simulations élémentaires s'échangeant des informations et appelées fédérés.

HLA est formellement définie par trois composants :

- Les règles HLA récapitulent les principes de HLA et définissent le fonctionnement des fédérés (5 règles) et des fédérations (5 règles).

- Les spécifications d'interface de HLA décrivent les services d'exécution fournis au fédéré par l'infrastructure d'exécution (RTI) (*Run-Time Infrastructure*). Elles indiquent comment les fédérés interagissent pendant l'exécution de la fédération. Le RTI constitue une implémentation informatique des spécifications d'interface de HLA. Il s'agit d'un ensemble de processus informatiques écrit dans un langage de programmation donné, qui joue le rôle d'un système d'exploitation distribué réduit. Il fournit un ensemble général de services qui supportent la simulation, qui assurent l'interaction entre les fédérés ainsi que la gestion de fédération au travers d'un réseau local ou longue distance.

- L'OMT (*Object Model Template*) est la description des éléments (objets et interactions) qui sont partagés à travers une fédération. HLA exige que chaque fédéré et fédération doit documenter son modèle d'objet en utilisant l'OMT. Ces modèles sont prévus pour faciliter la réutilisation des simulations. HLA spécifie deux types de modèles d'objets : le premier est le Modèle d'Objet de Fédération (FOM) qui décrit l'ensemble des objets, attributs et interactions qui sont partagés à travers la fédération. Le deuxième est le Modèle d'Objet de Simulation (SOM) qui fournit des informations sur la faculté de simulation et d'échange d'information lors d'une participation à une fédération.

Nous avons implémenté un fédéré EPA, tel que décrit au début de ce paragraphe, dupliqué en autant de partenaires que n'en compte le réseau partenarial logistique.

Une simulation permet d'illustrer d'une part le comportement interne d'une EPA, et d'autre part son

comportement avec les autres EPA au sein du RPL (illustration de l'auto organisation).

Considérons un réseau composé d'un client et de 4 fournisseurs. À partir de l'interface utilisateur (figure 88), un partenaire peut simplement devenir un membre du réseau d'entreprises. Ce partenaire se place en qualité de Client et/ou de Fournisseur.

Chaque AO est composé d'un HP et d'un HO :

- référence du produit [HP],
- type de travail réalisé (savoir faire métier) [HP],
- durée théorique de la tâche (ici, 55 min) [HP]
- délai maximum souhaité (ici, 10 jours) [OH],
- quantité du lot (ici, 22 pièces) [OH],
- date de fin de négociation (ici, 105 min) [OH],
- date de mise à disposition (ici, le 07/08) [OH].

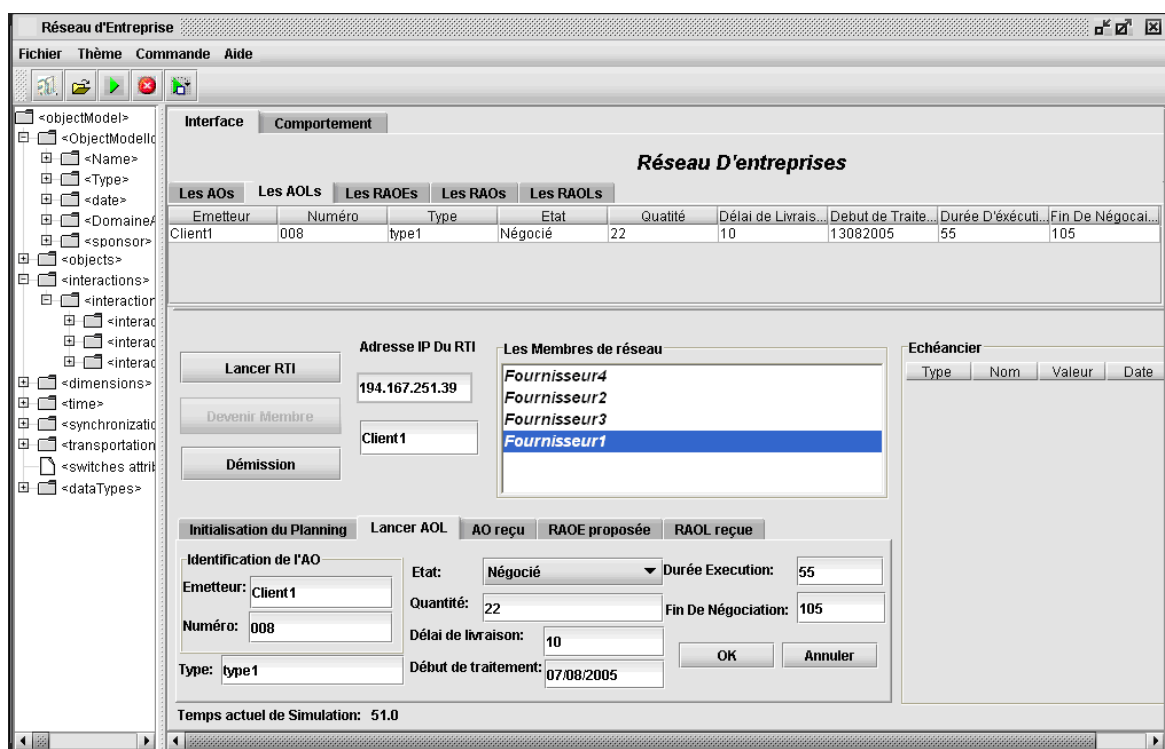


Figure 88 : Interface H/M d'un fédéré EPA

Le cas d'étude attrait à l'industrie cosmétique.

Nous avons considéré un réseau constitué de 17 entreprises, réparties sur six activités principales (Conception et Fabrication de produits cosmétiques, Fabrication Papier - Carton et Conditionnement papier, Fabrication de produits plastiques et Conditionnement plastique, Impression, ...) et pouvant exercer d'autres activités secondaires (figure 89). Seize types de produits, émanant de cinq produits principaux (PF1, PF2, PF3, PF4, PF5) sont fabriqués par ces différentes entreprises, sur des niveaux différents. Ainsi chaque entreprise peut être Client ou Fournisseur selon le type de produit considéré. Pour chacun des cinq types de produits principaux, les différents types ont la même nomenclature et la même gamme de fabrication, mais n'ont pas les mêmes temps unitaires de fabrication et ne passent pas nécessairement par les mêmes suites d'entreprises. Du point de vue des flux logiques, tout ceci correspond en fait à 16 chaînes logistiques correspondant chacune à la production d'un type de produit. Ce sont ces 16 flux qui sont observés.

Le jeu de données a été, d'une part, modélisé puis simulé sous Arena, en considérant une approche classique où les 16 chaînes logistiques ont été affectées de manière définitive aux 17 entreprises.

D'autre part, nous avons implémenté le même jeu de données sur notre maquette de simulation.

A1	Conception fabrication produits cosmétiques
	Fabrication produits plastiques
	Conditionnement en verre de produits
	Bouchage
	Étiquetage
	Assemblage produits
A2	Conception et Fabrication produits cosmétiques
	Conditionnement plastique des produits
	Bouchage
	Étiquetage
	Assemblage produits
A3	Conception Fabrication produits cosmétiques
A4	Conception Fabrication produits cosmétiques
	Conditionnement en verre de produits
	Bouchage
	Étiquetage
	Assemblage
B1	Fabrication transformation papier carton
	Conditionnement en papier de produits
B2	Fabrication transformation papier carton
	Conditionnement en papier de produits
	Impression
B3	Conditionnement en papier de produits
C1	Fabrication produits plastiques
	Conditionnement plastique de produits
	Bouchage
	Étiquetage
	Assemblage
C2	Fabrication produits plastiques
	Conditionnement plastique de produits
	Bouchage
	Assemblage
C3	Fabrication produits plastiques
	Conditionnement plastique de produits
	Bouchage
	Étiquetage
D1	Assemblage
	Fabrication tube souple
	Conditionnement tube souple
	Bouchage
	Étiquetage
D2	Fabrication Emballage en verre
	Conditionnement en verre de liquide
	Assemblage
	Fabrication tube souple
	Conditionnement tube souple
D3	Bouchage
	Fabrication Emballage en verre
	Conditionnement en verre de liquide
	Assemblage
	Fabrication tube souple
E1	Conditionnement tube souple
E2	Bouchage
M1	Étiquetage
M2	Fabrication Emballage en verre
	Conditionnement en verre de liquide
	Assemblage
	Fabrication transformation papier (carton, étiquettes...)
	Fabrication transformation papier (carton, étiquettes...)
	Impression
	Sérigraphie
	Impression
	Sérigraphie

Figure 89 : Description du cas d'études

Ce jeu de données a été ajusté de manière à ce que de petites perturbations (l'augmentation des quantités commandées par un client final) vis-à-vis du fonctionnement nominal génèrent de fortes perturbations organisationnelles dans l'écoulement des flux (blocage, saturation). Les mêmes perturbations ont été analysées avec comme objectif de comparer les résultats. Nous avons principalement étudié deux types de perturbations. Le premier type, porte sur l'introduction d'une perturbation dans les entreprises exerçant le plus d'activités. La perturbation a porté sur le lancement de commande sur des lots supplémentaires par les clients des entreprises en question, sur l'horizon d'une même semaine. Dans le second type de perturbation, nous nous sommes intéressés aux entreprises impliquées dans la réalisation de plusieurs produits. Dans le même contexte que le premier type de perturbation, nous avons supposé qu'au cours d'une même semaine, les entreprises fournisseurs reçoivent des commandes sur des lots supplémentaires de la part de leurs clients.

Le premier type, porte sur l'introduction d'une perturbation dans les entreprises exerçant le plus d'activités. La perturbation a porté sur le lancement de commande sur des lots supplémentaires par les clients des entreprises en question, sur l'horizon d'une même semaine.

Dans le second type de perturbation, nous nous sommes intéressés aux entreprises impliquées dans la réalisation de plusieurs produits. Dans le même contexte que le premier type de perturbation, nous avons supposé qu'au cours d'une même semaine, les entreprises fournisseurs reçoivent des commandes sur des lots supplémentaires de la part de leurs clients.

Perturbation de type 1 : Perturbation/entreprises exerçant le plus d'activités

Nous avons choisi d'axer l'étude de l'influence des perturbations sur la première chaîne logistique constituée des entreprises A2, C1, E2, M1 et B1. Ceci est dû, d'une part, au fait que deux types de produits y transitent, et d'autre part, à la diversité des activités de l'entreprise A2. Nous pouvons remarquer que les entreprises appartenant à cette chaîne appartiennent également à d'autres chaînes logistiques.

La perturbation introduite concerne l'augmentation de la quantité de produits commandée par le client à l'entreprise A2. Nous étudierons l'impact de la perturbation sur la chaîne considérée, mais vu que chaque entreprise de celle-ci appartient à plusieurs autres chaînes, cet impact aura également une influence sur les autres entreprises des autres chaînes.

Lors de l'étude de l'approche classique, nous avons étudié l'influence des perturbations injectées sur les entreprises A2, B1 et M1 dont la charge dépassait la capacité maximale.

Dans le cadre de l'approche auto-organisée, ces entreprises ne traiteraient pas les Appels d'Offres qui causent leur surcharge, comme nous l'avons expliqué précédemment.

Ceci est mis en évidence par les graphiques de la figure 90 :

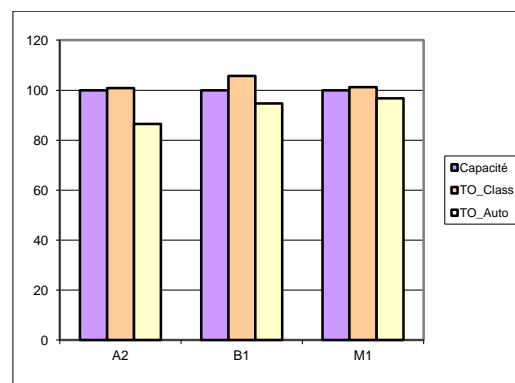


Figure 90 : Taux d'occupation de A2, B1 et M1

L'approche isoarchique permet d'obtenir une solution réaliste et donc réalisable, ne générant pas de répercussions de surcharge sur les autres entreprises du réseau, alors que l'approche classique génère des problèmes de fonctionnement du réseau puisque elle propose des solutions avec des surcharges.

Perturbation de type 2 : Perturbation/entreprises impliquées dans plusieurs chaînes

Pour ce type de perturbation, nous avons axé notre étude sur les entreprises appartenant à plusieurs chaînes. Ce qui nous a amené à considérer sept types de produits (les types 3, 4, 5, 6, 7, 10 et 12). La perturbation consiste à augmenter la quantité commandée sur chacun des sept types de produit. Une première analyse du modèle classique nous a permis de mettre en évidence le dépassement de capacité au niveau des entreprises appartenant au flux de l'un des sept types concernés par la perturbation. Ce dépassement a entraîné des retards de livraison non seulement sur les sept types de produits mais aussi sur d'autres produits. Il y a donc eu des répercussions sur d'autres chaînes.

Dans un fonctionnement isoarchique, l'adaptation des chaînes logistiques se fait au fur et à mesure de l'attribution des AOs lancés aux fournisseurs ayant la meilleure performance pour cet AO. La meilleure performance sous entend d'une part, que le meilleur fournisseur prend l'Appel d'Offre sur lequel il est meilleur, ce qui garantit une

meilleure satisfaction du client. D'autre part, une entreprise ne peut plus prendre d'Appel d'Offre si sa capacité maximale ne le lui permet pas, autrement dit, si son planning est plein. Ceci engendre un lissage des charges au sein de chaque entreprise et supprime le problème de retard dû au dépassement de capacité provoqué dans une approche classique, comme il a été expliqué plus haut.

Afin de bien montrer le lissage de la charge au niveau de chaque entreprise du jeu de donnée élaboré, nous avons représenté graphiquement, d'une part, la charge de chaque entreprise par rapport à sa capacité maximale, d'autre part, nous avons présenté le taux d'occupation de chacune des entreprises étudiées dans chacune des deux approches. Sur la figure 91 ci-dessous, nous avons présenté le taux d'occupation par rapport à la charge globale, puis sur la figure 92, nous avons présenté le taux d'occupation de chacune des entreprises par rapport à leurs activités.

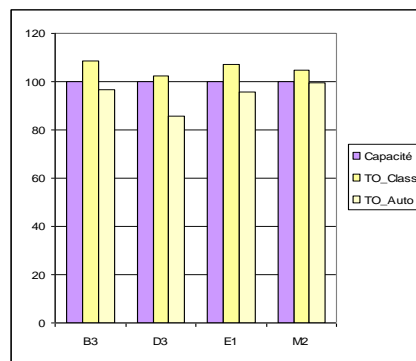


Figure 91 : Taux d'occupation de B3, D3, E1 et M2

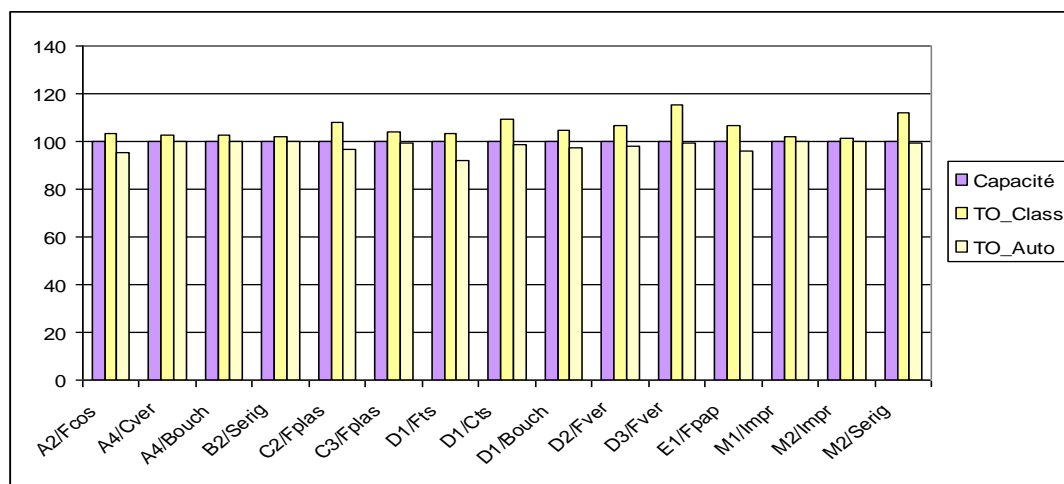


Figure 92 : Taux d'occupation de A2, A4, B2, C2, C3, D1, D2, D3, E1, M1, et M2

L'étude de cette application a donné lieu à communications entre 2001 et 2008 dans 12 congrès avec comité de lecture, quatre chapitres dans des ouvrages collectifs, ainsi qu'à la parution de quatre papiers dans les revues internationales *International Journal of Logistics Management* (2005), *Production, Planning and Control* (2007), *Journal of Intelligent Manufacturing* (2009) et *Logistics Systems and Management* (2009).

3.5. Pilotage isoarchique d'un *Job Shop* en flux tiré

- **Présentation de la problématique**

Les techniques de production en flux tiré, dite '*Just In Time*', rencontrent depuis quelques décennies un succès retentissant pour la production de masse avec une quasi généralisation dans certains secteurs industriels. Il faut reconnaître l'efficacité de techniques comme le *kanban* pour absorber de légères variations du volume de production d'un *Flow Shop* et adapter en temps réel les flux nécessaires et suffisants d'encours. Ces techniques doivent être toutefois soutenues par un ensemble de bonnes pratiques connexes, orientées Qualité, au premier rang desquelles nous trouvons le SMED (*Single Minute Exchange of Die*), la TPM (Topomaintenance)...

Vu la performance des résultats obtenus, il serait intéressant d'appliquer les mêmes principes d'organisation et de gestion de la production à d'autres contextes de production manufacturière. En effet, de nouvelles techniques de pilotage d'atelier sont nécessaires pour répondre aux conditions de plus en plus exigeantes de la production industrielle de petites et moyennes séries. Toutefois, le JTT reste délicat à mettre en place dans un *Job Shop*, car le *kanban* ne s'applique pas hors du contexte d'une production en grandes quantités : pour tirer les flux dans un *job shop*, il n'est pas possible d'utiliser les niveaux de stock d'encours (c'est-à-dire le nombre de *kanbans* présents dans le planning) sont utilisés comme consignes de pilotage, et il faut trouver d'autres solutions. En tout cas, le seul déploiement des bonnes pratiques connexes ne suffit pas pour créer un résultat similaire et les recettes mises en place relèvent souvent de l'empirisme. Certains prônent une approche *lean* permettant de travailler au plus juste en très petites séries. Toutefois, les outils *lean*, tels que le *heijunka* ou le management visuel, reposent essentiellement sur l'apprentissage et l'expérience, et manquent de formalisme et/ou de rigueur scientifique. Par ailleurs, les heuristiques traditionnellement utilisées en ordonnancement classique trouvent ici leurs limites du fait

Nous présentons dans ce paragraphe une manière radicalement novatrice pour organiser le pilotage opérationnel d'un *Job Shop*, en se fondant une simple mise en œuvre de PROSIS.

Nous avons développé une stratégie visant à créer artificiellement un effet de flux tiré. L'approche holonique PROSIS offre, grâce à sa structure décisionnelle isoarchique et son processus d'aide à la prise de décision basé sur l'analyse multicritère, l'opportunité de trouver un compromis entre les intérêts divergents des Holons Produit, des Holons Ressource et des Holons Ordre. En effet, ces différents holons ne recherchent pas tous le même objectif, il est donc nécessaire de trouver le meilleur compromis possible pour trouver une solution de pilotage qui soit une solution 'contextuellement' optimale, et qui respecte la stratégie de flux tirés.

Un des critères, considéré comme fondamental dans l'analyse multicritère considérée, permet de favoriser les produits dont l'état d'avancement est proche de l'état final.

- **Modélisation PROSIS**

Pour cela, au travers d'une structure hiérarchique de décision, nous exprimons l'ensemble des choix (critères et indicateurs associés) relatifs aux différents holons (figure 93).

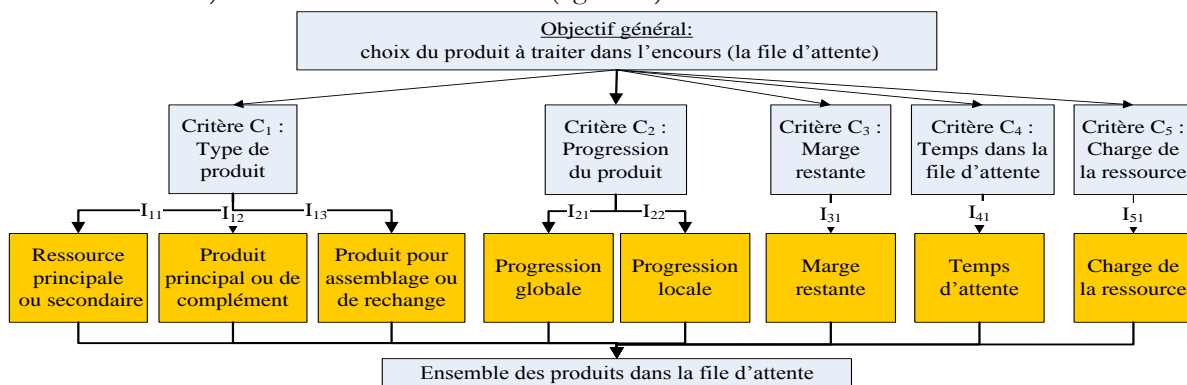


Figure 93 : Structure hiérarchique de décision multicritère

Une ressource doit rechercher avant tout la productivité, qui minimise les coûts d'exploitation de la ressource. Ceci peut être évalué au travers d'un indicateur tel que le REP (Ratio d'Efficacité du Processus), qui doit être maximum. Une stratégie consiste à éviter de laisser la ressource à l'arrêt, et pour cela à compléter la charge correspondant à la production principale par une production secondaire, forcément moins prioritaire.

Un premier critère C_1 , liant chaque HR aux HP, permet de prioriser certains types de production, en fonction de leur appartenance à différentes classes : ressource principale (ressource dédiée au produit) ou secondaire (ressource de remplacement en cas d'indisponibilité d'une ressource équivalente), produit faisant ou non l'objet d'un volume de production substantiel et géré selon une approche 'ligne de production', produit pour un assemblage d'appareils neufs ou produit pour pièce de rechange... Chacun des indicateurs associés (I_{11} , I_{12} , I_{13}) sont des indicateurs qualitatifs, définis par des valeurs actualisées périodiquement par le management de l'atelier.

Une autre idée intéressante est d'éviter de travailler sans efficacité. Plus la charge d'une ressource est élevée, plus il devient judicieux de privilégier les produits de priorité élevée. De même, il n'est pas judicieux de traiter un produit de priorité faible ou moyenne sur une ressource si la ressource suivante le concernant est surchargée. Le critère C_5 est relatif au taux d'occupation de la ressource et permet de prendre ces contraintes en considération. Dans les autres cas, ce critère n'influencera pas le classement obtenu par l'algorithme AHP. L'indicateur I_{51} , associé à ce critère, quantifie le cumul des tâches en attente dans l'encours de la machine.

Le coût minimal d'obtention est un objectif fondamental à atteindre pour un HP. Comme les temps technologiques de traitement sont généralement optimisés par les réglages ad hoc du procédé, nous ne pouvons agir efficacement qu'en minimisant la durée d'attente du produit. Si cela est réalisé systématiquement dans tous les encours traversés par les produits, nous obtenons le cycle moyen d'obtention le plus court possible, et donc les coûts d'immobilisation les plus faibles.

Pour répondre à cet objectif, nous avons développé une stratégie visant à créer artificiellement un effet de flux tiré. Le critère C_2 permet de favoriser les HP dont l'état d'avancement est proche de l'état final. Soit n , le nombre de phases de traitement à effectuer sur un HP et k la phase actuelle du HP. Plus le HP est proche de son achèvement (k/n proche de 1), plus la priorité de ce HP devra être importante. L'indicateur I_{21} ($I_{21}=k/n$), correspondant à la progression globale du produit, permet de dynamiser l'écoulement des flux tout au long de la 'ligne virtuelle de production' associée à sa gamme (c'est-à-dire la suite des ressources traversées par le HP). Cet appel par l'aval est suscité par le HP lui-même. Autrement dit, les HP contribuent prioritairement à vider le système de production, ce qui libère de la capacité que les HR se chargent d'utiliser. De même, toujours pour minimiser les délais d'attente, un indicateur de progression locale I_{22} favorise l'écoulement des flux d'un HP s'il s'avère que le HR suivant concernant cet HP le traitera sûrement dans la foulée. Ceci n'implique aucun engagement prévisionnel. Enfin, différents produits de priorités diverses circulent simultanément dans le système de production. Un risque non négligeable serait 'd'enterrer' un produit de faible priorité dans une file d'attente et de ne plus pouvoir l'en sortir. Le critère C_4 et son indicateur I_{41} , constitué de la durée d'attente du HP devant un HR, vise à le sortir de la file d'attente s'il y séjourne depuis trop longtemps, en augmentant pour cela, son importance relative.

Du point de vue du holon ordre, l'objectif fondamental est le respect des dates de livraison. C'est un aspect assez classique en ordonnancement. Notre critère C_3 examine la marge restante pour chaque HP : dans le cas où le nombre d'opérations restantes sur un HP est important et que la date de livraison de l'HO auquel il est rattaché approche, il devient urgent de le prioriser vis-à-vis d'autres HP. Ce critère permet donc de respecter les dates de livraison d'un HO. Pour un HO constitué de plusieurs HP, nous pouvons considérer qu'une grande partie des HP sera traitée dans les temps, mais qu'il pourra subsister quelques HP 'retardataires' : ce critère vise à accélérer le traitement de ces derniers. L'indicateur associé I_{31} est donné par la formule : $I_{31} = \text{durée_restante} - \text{durée_des_phases_restantes}$. Plus I_{31} est petit, plus le HP concerné sera priorisé.

Bien entendu, d'autres indicateurs pourraient être utilisés comme par exemple une marge restante pondérée ($I_{31}/\text{nombre_de_phases_restantes}$) ou le *Critical Ratio* (Berry et Rao 1975) ($CR = [D_i - \tau] / \sum t_{ij}$, avec D_i étant la « due date » du HO_i , t_{ij} la durée opératoire du HP_i lors de l'étape j de son traitement par le HR *ad hoc* et τ la date courante), qui argumenteraient sous différents aspects la prise en compte de la marge restante.

- **Résultats obtenus**

Le cas d'étude présenté ici est issu de l'industrie aéronautique. Après une présentation rapide de l'unité de production ayant fourni le jeu d'essai, nous présentons le système isoarchique construit afin de montrer la faisabilité de l'approche et les résultats obtenus sous différentes conditions d'expérimentation.

Le système de production considéré est un atelier de production mécanique fabricant de manière récurrente une vingtaine de types différents de pièces, principalement des 'arbres' et des 'manchons' de grandes tailles, ayant des tolérances serrées et des gammes complexes et étant au cœur des systèmes aéroportés fabriqués par l'entreprise. Cet atelier comporte une quinzaine de machines de type centre de production CNC polyvalent de haute précision, de grandes capacités et dotés de tous les équipements périphériques *ad hoc*. La taille des lots dépasse rarement une quinzaine de pièces, chaque pièce représentant une valeur de plusieurs centaines de milliers d'euros. Le cycle d'encours peut atteindre pour les productions les plus complexes 6 mois. Pour des raisons de confidentialité, il nous est impossible de décrire plus finement le cas d'essai.

Différents problèmes sont observés dans le fonctionnement de cet atelier. Le pilotage de l'atelier est issu d'un calcul MRP classique, associé à des tailles de lot obtenues *via* des calculs d'optimisation économique qui sont devenus obsolètes, vu l'utilisation récente de machines palettisées où les tâches de préparation sont effectuées en temps masqué. Nous constatons des temps de cycle trop longs, certaines pièces pouvant rester jusqu'à 6 mois dans l'atelier. Ceci engendre des retards de livraison chroniques. Par ailleurs, un manque de synchronisation laisse les ressources sans occupation une partie du temps, et le REP est faible (< à 50%).

Le système de pilotage de l'atelier est composé d'une isoarchie constituée de tous les holons de l'atelier :

$$[I_{\text{ate}}] = \{\{HP\}, \{HR\}, \{HO\}\}$$

Toutefois, la prise de décision de pilotage sera exclusivement locale, et prise dans le contexte restreint d'une EPA :

$$[I_{\text{EPA}\lambda}] = \{\{HP\}_{\lambda}, HR_{\lambda}, \{HO\}_{\lambda}\}$$

La maquette développée permet, à partir d'une variable booléenne définie en début de simulation, soit d'utiliser une discipline de référence dans le WIP, soit d'utiliser la discipline issue du service d'aide à la décision multicritère, qui utilise l'algorithme AHP selon la structure de décision précédemment décrite à la figure 93. Cette possibilité de choix d'expérimentation est illustrée par la figure 94. La discipline de référence a été choisie de manière à ce que les résultats obtenus par la simulation utilisant ce mode soit du même ordre que ceux observés dans le système réel. L'expérience nous a montré que l'heuristique d'ordonnancement mise en place antérieurement dans le logiciel de Gestion de Production Assisté par Ordinateur de l'atelier pour une production par lots donnait des résultats équivalents à une heuristique de type FIFO fonctionnant en 'one part flow' (lots de taille = 1). Nous avons pris la précaution d'augmenter légèrement les durées des tâches opérationnelles, en substitution des tâches antérieures de setup qui disparaissent, ceci dans l'esprit d'une démarche type SMED visant à mettre en place des changements rapides et fréquents de production.

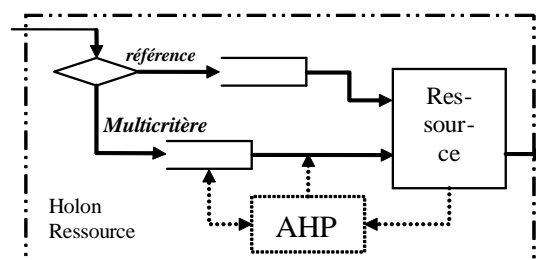


Figure 94 : Choix d'expérimentation

Nous allons maintenant régler les préférences relatives entre critères et entre indicateurs.

L'algorithme AHP peut être configuré pour chaque ressource selon un propre jeu de pondération. La matrice d'importance relative des critères [C] (exemple donné à la figure 95) est constante sur tous les HR. Ces valeurs traduisent la stratégie de pilotage souhaitée dans l'atelier. Il en est de même pour les matrices d'importance relative $[I_{Ck}]$ entre les indicateurs I_{C1} et I_{C2} . Par contre, les matrices $[P_{kx}]$ d'importance relative entre alternatives, pour un indicateur donné, ont leur dimension qui varie en fonction du nombre de HP dans l'encours. Cette dimension dépend déjà du nombre de types de produits différents habilités à passer par la ressource.

	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅
C ₁	1	1/3	1/3	3	1
C ₂	3	1	1	9	3
C ₃	3	1	1	9	3
C ₄	1/3	1/9	1/9	1	1/3
C ₅	1	1/3	1/3	3	1

Figure 95 : Matrice d'importance relative entre critères [C]

Les éléments p_{kxij} sont directement calculés à partir des valeurs des indicateurs, qu'ils soient eux-mêmes des valeurs prédéfinies ou des valeurs calculées à partir des attributs de certains composants du modèle de simulation.

La figure 96 montre un exemple de matrice $[P_{kx}]$, après récupération des données pour construire les indicateurs et calculs des ratios p_{kxij} . Nous y observons que des produits pouvant être traités par la ressource peuvent être absents de l'encours sans aucun problème.

	P1	P2	P3	P7	P11	P12	P21	P27	P28	P32	P34	P35	P37	P43	P45	P49
P1	1	0,1	0,12	0,5	0,14	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
P2	10	1	1,25	5	1,43	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
P3	8	0,8	1	4	1,14	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
P7	2	0,2	0,25	1	0,28	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
P11	7	0,7	0,87	3,5	1	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
P12	1	0,1	0,12	0,5	0,14	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
P21	1	0,1	0,12	0,5	0,14	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
P27	1	0,1	0,12	0,5	0,14	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
P28	1	0,1	0,12	0,5	0,14	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
P32	1	0,1	0,12	0,5	0,14	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
P34	1	0,1	0,12	0,5	0,14	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
P35	1	0,1	0,12	0,5	0,14	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
P37	1	0,1	0,12	0,5	0,14	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
P43	1	0,1	0,12	0,5	0,14	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
P45	1	0,1	0,12	0,5	0,14	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
P49	1	0,1	0,12	0,5	0,14	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Figure 96 : Exemple de matrice $[P_{kx}]$ entre 16 alternatives possibles (5 produits effectivement dans l'encours).

Les expérimentations conduites via le modèle présenté ci-dessus ont utilisées un jeu de données correspondant à 18 mois de production réelle de l'atelier. Cette période témoin est suffisamment grande pour témoigner de la diversité des situations de production. Par ailleurs, la période étant déjà achevée, la performance réelle de l'atelier en termes

de productivité était connue. Les noms des produits et des ressources ont été rendus anonymes.

Nous avons donc utilisé les mêmes dates de lancement que celles utilisées en production réelle. La seule modification vient de la transformation des lots i de taille n_i en n_i lots de taille unitaire. Ceci revient à favoriser une approche de production pièce/pièce, plus fluide que la traditionnelle approche par lots économiques qui génère des problèmes de synchronisation de tâches qui dégradent le REP.

Dans le cas d'expérimentations conduites en discipline de référence, les produits sont traités séquentiellement par la ressource, selon l'ordre d'arrivée dans le stock d'encours. Rien que le passage à une stratégie 'lots de taille : 1' donne une productivité légèrement meilleure que la meilleure des heuristiques d'ordonnancement par lots utilisée dans l'atelier. Pour des raisons de confidentialité, nous ne pouvons donner ici de valeurs quantitatives.

Dans le cas d'expérimentations en discipline multicritère, les choix dans le WIP du Holon Produit à traiter par chaque holon ressource se fait en temps réel, c'est-à-dire durant l'instant courant de simulation. Lorsque la ressource achève un produit se pose alors le choix du produit suivant, avec appel au service de l'algorithme AHP.

La figure 97 présente les résultats moyens sur la période de 18 mois : il s'agit de la moyenne des temps de passage des pièces dans l'atelier, par type de pièces. Ne sont indiquées que les produits de type 'arbre'. Les pièces de type 'manchon' donnent des résultats similaires et les pièces de complément ne sont pas concernées par des critères de productivité. Par ailleurs, il est à noter que les résultats en mode de référence présentent des indicateurs de performances tout à fait comparables à ceux obtenus à partir du fonctionnement réel de l'atelier. Ces résultats montrent la réduction du temps de cycle de la quasi-totalité des produits. Seule une anomalie apparaît sur le produit 14. Après vérification, ce produit correspond à une production marginale, en faible quantité, pour le retrofit d'anciens appareils.

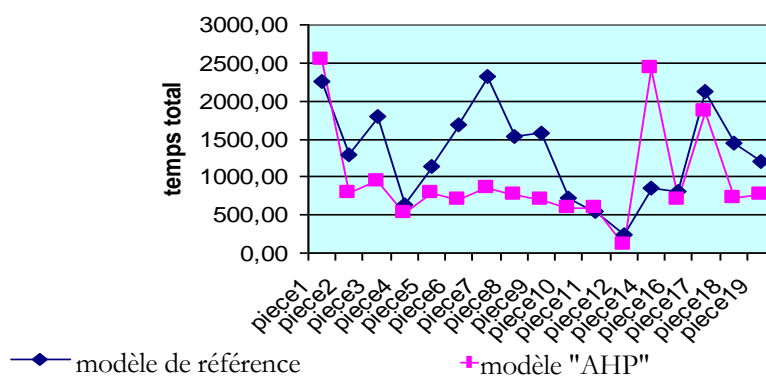


Figure 97 : Comparaison des résultats selon les 2 disciplines de gestion des encours.

La figure 98 présente la synthèse des résultats obtenus, c'est-à-dire la moyenne pondérée par les quantités, tous types confondus :

	<Temps total> (h)	<Temps d'attente> (h)	REP (%)
Discipline référence	1304,53	697,93	46,49 %
Discipline AHP	961,35	354,32	63,14 %
Variation (%)	- 26,31 %	- 49,23 %	+ 35,81 %

Figure 98 : Améliorations de performance obtenues.

Sur l'ensemble de la production, nous observons une diminution supérieure à 25% du temps moyen de production. Cette amélioration est totalement due à la réduction très forte des temps d'attente, de l'ordre de 50% en moyenne, soit une progression du REP de 35%.

- **Plateforme de simulation distribuée et interopérable pour l'expérimentation**

Une plateforme de démonstration a été développée en Java, en utilisant la simulation distribuée HLA (High Level Architecture - IEEE P1516), ce qui permet l'analyse formelle des problèmes de synchronisation.

Cela vise à obtenir un outil de pilotage interopérable, permettant de basculer aisément entre les 4 modes d'expérimentation (Pfeiffer *et al.* 2003) : le système de pilotage peut être étudié et/ou utilisé sur une partie opérative réelle ou émulée via un simulateur industriel.

Cette maquette permet de poursuivre les expérimentations dans des conditions proches du système réel de production (figure 99). Dans cette plateforme, une isoarchie de ressources est une fédération de simulation et chaque fédéré EPA est attaché à un holon ressource et supporte la I_ressource. Il accueille les I_ordres et I_produits nécessaires à l'expression de la circulation des holons ordres et produits. Il met en œuvre tous les mécanismes de pilotage multicritère précédemment évoqués

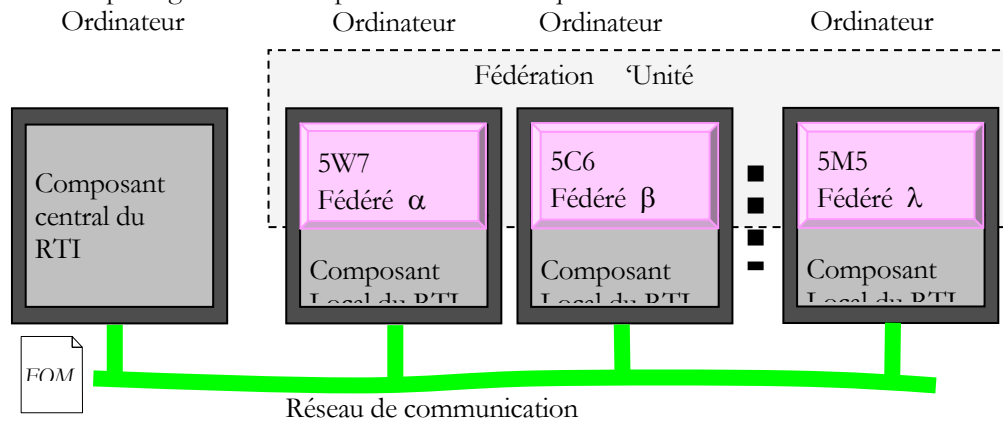


Figure 99 : Structure de simulation HLA

Nous pourrions alors comparer les différentes performances obtenues par le système de production en configurant différents jeux de paramètres de l'algorithme AHP, et en cherchant à optimiser cette configuration. Nous obtenons alors une architecture générique de simulation pour un système de pilotage holonique isoarchique qui pourra être utilisé pour d'autres Job Shop.

Cette maquette pourra être également interopérable avec un atelier réel (c'est l'une des propriétés les plus intéressantes d'HLA...) : il pourra alors être mis en place des tests partiels n'impliquant qu'une partie d'un système de production.

A titre illustratif, la figure 100 montre une copie d'écran de l'IHM d'un poste de travail attaché à une EPA, permettant l'accès à toutes les données des holons concernés et à tous les paramètres des services proposés (AHP, indicateurs...). La partie droite de l'écran contient toutes les informations relatives à l'encours au pied de la machine. La partie gauche supérieure permet la visualisation de l'état de la ressource (machine, poste...). La partie gauche inférieure concerne les échanges d'informations liées à la circulation en parallèle des produits entre les ressources.

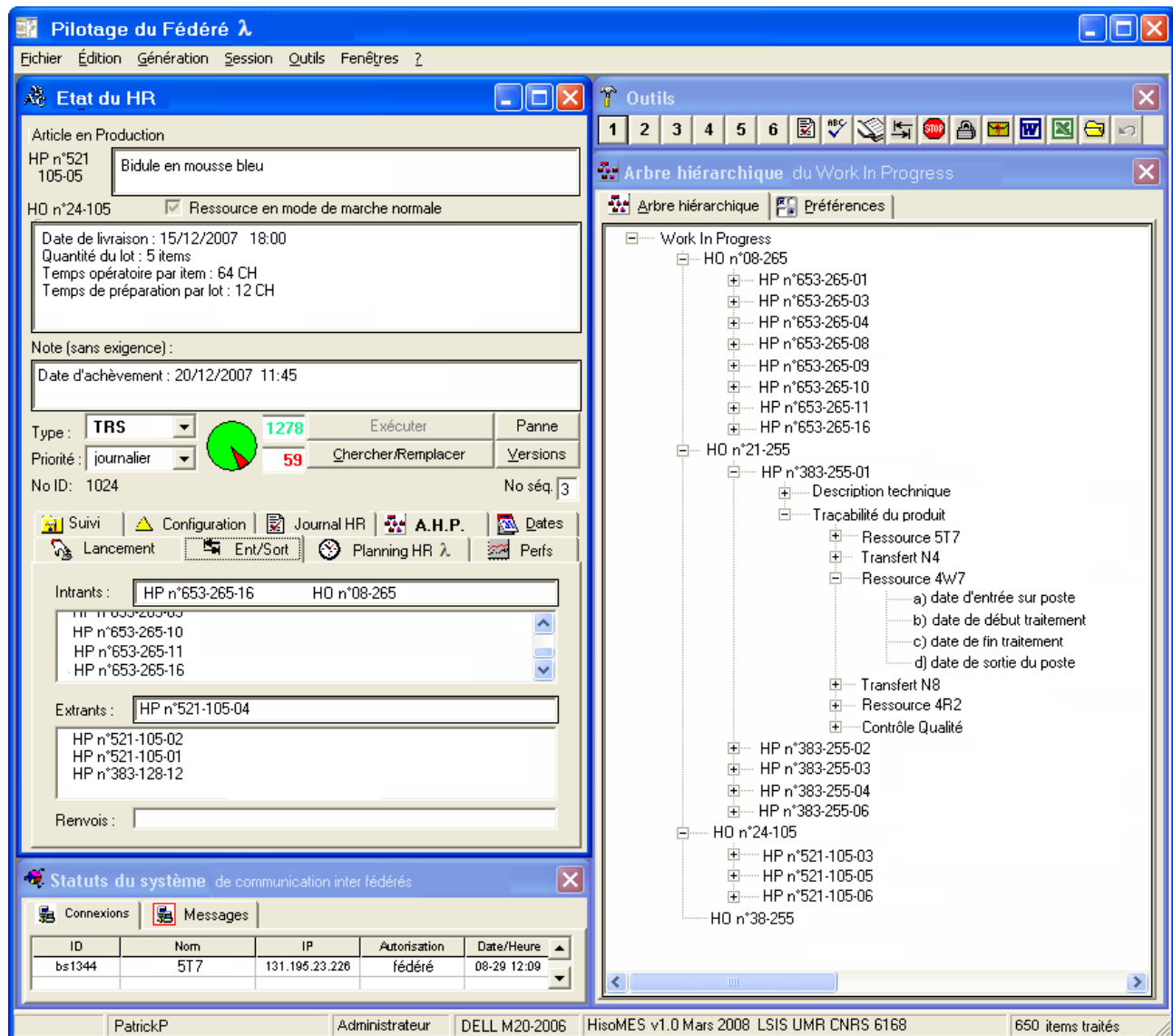


Figure 100 : IHM d'un poste de travail

L'étude d'un *Job Shop* en flux tiré selon une approche isoarchique a donné lieu à communications entre 2006 et 2009 dans 5 congrès internationaux avec comité de lecture, ainsi qu'à la parution de deux papiers dans les revues internationales *Journal Européen des Systèmes Automatisés* (2009) et *Journal of Intelligent Manufacturing* (2009).

4. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

4.1. Développement des systèmes de pilotage isoarchique

- **État du déploiement du modèle PROSIS**

Apparue depuis 2 décennies, l'exploration des solutions d'architectures non centralisées et/ou non hiérarchisées pour le contrôle et le pilotage des systèmes a donné lieu, comme nous l'avons vu dans la première partie de ce mémoire, à une multitude de travaux et de publications.

Ces solutions sont d'inspiration hétérarchique, c'est-à-dire qu'elles sont élaborées sur la base d'une distribution des centres de décision, ce qui a pour effet de favoriser l'autonomie et l'adaptabilité, mais en laissant le plus souvent une certaine place à des prises de décision hiérarchiques, au moins en terme d'ultime recours face à des situations de blocage.

Par ailleurs, elles abordent le plus souvent la recherche de la meilleure solution en favorisant le plus souvent un seul point de vue ou un seul objectif, qui devient la cheville ouvrière de la recherche de l'optimalité. C'est le cas lorsqu'un ensemble de règles réflexes sont systématiquement utilisées et cela a tendance à dénaturer la complexité réelle des problèmes rencontrés lors du pilotage des systèmes de production.

Initialement focalisé sur le pilotage décentralisé des systèmes de production *via* leurs ressources automatisées, nos travaux se sont orientés, notamment par la contribution à nos réflexions du paradigme holonique et de l'architecture de référence PROSA, vers la prise en compte de la totalité des entités concernées par cette complexité, pour les faire contribuer à la prise de décision.

En définitive, nous avons proposé une approche résolument différente, en supprimant radicalement toute notion de prise de décision hiérarchique et/ou prévisionnelle, et en favorisant l'interaction et la recherche d'un compromis optimal. Ceci nous a amené à proposer le modèle PROSIS (Product, Resource, Order & Simulation Isoarchic System), qui enrichit le paradigme holonique du concept d'isoarchie, structure architecturale au sein de laquelle peuvent s'exprimer différentes méthodes pour l'analyse et la prise de décision s'abstenant de considérations hiérarchiques.

Les propositions que nous formulons visent à montrer que des systèmes peuvent fonctionner sans aucune hiérarchie, tout en intégrant des prises de décision relatives à des points de vue différents, voire antagonistes, au travers d'une analyse multicritère contribuant à la construction de la solution de pilotage. En fait, il s'agit de rechercher des mécanismes de décision qui doteront les différentes entités en interaction dans le système (ressources (machines, équipements, acteurs, opérateurs), ordres & produits) de comportements permettant l'accomplissement *ad hoc* des tâches.

Au delà de ces méthodes d'analyse, PROSIS a fait l'objet d'une multi formalisation par des modèles UML (*Unified Modeling Language*), pour les aspects structurants et/ou statiques de la modélisation des holons, et par des modèles SED (Système à Événements Discrets) type G-DEVS (*Generalized Discrete EVents Specification*), lorsque les comportements relèvent d'une dynamique qui doit être décrite finement et sans ambiguïté du point de vue temporel, comme dans le cas, par exemple, pour les mécanismes de négociation entre holons.

Les points de vue d'optimisation relatifs à ces holons sont synthétisés *via* l'utilisation de méthodes d'analyse multicritères par agrégation complète, qui relèvent de la recherche opérationnelle. Il s'agit plus précisément d'AHP (*Analytic Hierarchy Process*), mais nous avons commencé à intégrer ANP (*Analytic Network Process*), qui est la généralisation d'AHP, dans la poursuite de nos travaux.

Enfin, nous avons mis en évidence dans ce mémoire les différentes facettes du bon comportement observé lors des multiples expérimentations effectuées sur les nombreuses maquettes de test réalisées. Cette validation par morceaux montre l'intérêt à porter à cette proposition.

Cela dit, le champ d'investigation et de recherche reste encore large et doit faire l'objet de nombreux travaux complémentaires.

- **Orientation générale de mes travaux de Recherche à venir**

L'étude, la modélisation et la validation de systèmes de pilotage isoarchique est un champ de recherche scientifique novateur, où la complexité des interactions entre acteurs implique l'usage de mécanismes d'aide à la décision multicritères rarement utilisés dans ce contexte.

Des actions ciblées à court et moyen termes doivent permettre de consolider le socle actuel sur lequel repose la démonstration du bien fondé de PROSIS. En particulier, l'unification de la modélisation de l'approche, présentée dans ce mémoire, va permettre de réaliser un démonstrateur à la fois complet et polyvalent, c'est-à-dire pouvant être utilisé indépendamment d'un système réel de production, afin :

- de montrer le fonctionnement de ce système s'il était piloté avec une approche de type PROSIS,
- d'évaluer de manière précise la performance pouvant être ainsi atteinte par un réglage donné du paramétrage de ce système.

Ceci passe tout d'abord par la finalisation du déploiement de PROSIS, avec l'intégration complète de tous les services ambiants et des technologies infotroniques. Pour cela, nous avons défini une EPA type, généralisée au sein de la Plateforme Polyvalente de Production mise en place à St Jérôme, sur la base de l'utilisation de la technologie HLA permettant la simulation distribuée de l'ensemble des holons et l'interopérabilité entre le monde réel et celui de la simulation.

Ensuite, l'objectif est également de développer de nouveaux services ambiants visant à faciliter l'optimalité du fonctionnement, notamment eu égard aux possibilités qu'apportent la simulation des Systèmes à Événements Discrets. Nous allons développer le rôle du Holon Simulation, ce qui permettra d'anticiper l'apparition de situations pouvant entraîner une baisse de performance.

Parallèlement, afin de procéder à l'affinage des paramètres de réglage du pilotage et améliorer ainsi cette performance, nous développerons une méta heuristique de recherche du meilleur réglage possible.

Dans ce contexte, l'objectif visé à plus long terme est d'établir et d'implémenter des services ambiants génériques permettant des comportements décisionnels interactifs et totalement automatisables, relatifs à des acteurs relevant du paradigme holonique. Ces acteurs ne seront pas nécessairement des holons relevant du domaine de la production manufacturière, mais pourront utiliser l'expérience et la connaissance acquise dans ce domaine. Pour obtenir la meilleure performance possible du Système à Événements Discrets composé de ces holons, ces comportements devront traduire l'autonomie des holons, c'est-à-dire leur permettre sans latence une grande adaptabilité face aux événements, perturbants ou non.

Dans ces conditions, le thème principalement étudié dans nos recherches visera toujours à l'intégration, dans le mécanisme décisionnel d'un système de pilotage issu du paradigme holonique et utilisant les concepts de l'Ambient Intelligence, d'éléments de la théorie des priorités et de la théorie des hiérarchies ouvertes, afin d'obtenir des systèmes fonctionnant sans contrôle hiérarchique malgré leur complexité croissante.

Nous allons maintenant détailler un peu plus ces différents points.

4.2. Finalisation du déploiement de PROSIS

Un certain nombre d'actions de recherche à court terme sont envisagées pour pouvoir disposer rapidement d'un outil de test et d'évaluation du modèle PROSIS pour le pilotage des systèmes de production.

- **Intégration complète de PROSIS et mise en œuvre de la Plateforme Polyvalente de Production P³**

La Plateforme Polyvalente de Production (P³), conjointement financée par le département de Génie Industriel et Informatique de Polytech'Marseille et le Laboratoire des Sciences de l'Information et des Systèmes (LSIS – UMR CNRS 6168), avec le soutien de l'Institut Carnot STAR, est un outil conçu pour la formation initiale et la formation par la recherche aux modes innovants de gestion et de pilotage d'atelier. Il reproduit toutes les fonctionnalités d'une usine de production manufacturière moderne, il permet d'aborder toutes les techniques modernes de management de la production et d'investiguer toutes les problématiques émergentes dans le domaine et relatives aux nouveaux modes de pilotage des systèmes de production.

Cette plateforme est articulée autour d'un système opérant de production intégrant toutes les technologies actuelles (transitique, robotique, transstockeur, traçabilité RFID...) associé à un système de management intégré de type ERP (Enterprise Resource Planning).

L'ERP choisi pour supporter le système d'information et de management est Sage X3 Premium édition. Une salle dédiée à cet ERP est associée au système opérationnel.

Le système opérant de production est organisé autour d'un système de transitique *Montrac Chaos*, permettant de gérer automatiquement et de manière flexible tous les flux de produits et tous les modes de gestion de production possibles.

La plateforme P³ est conçue pour produire des petits objets manufacturés. Pour cela, une douzaine de postes de travail polyvalents (reconfigurables) sont repartis autour des 3 boucles de transport et desservis par les navettes automotrices *Montrac*. Cela donne :

- 11 postes polyvalents, équipés de coupleurs RFID *Amesys* compatibles ISO 14443 & ISO 15693 ;
- 1 poste d'entrée sortie (entrée des matières brutes et sorties des produits finis) ;
- 2 robots industriels de chargement-déchargement des navettes et communs à plusieurs postes ;
- entre 3 et 6 navettes équipées d'un coupleur RFID.

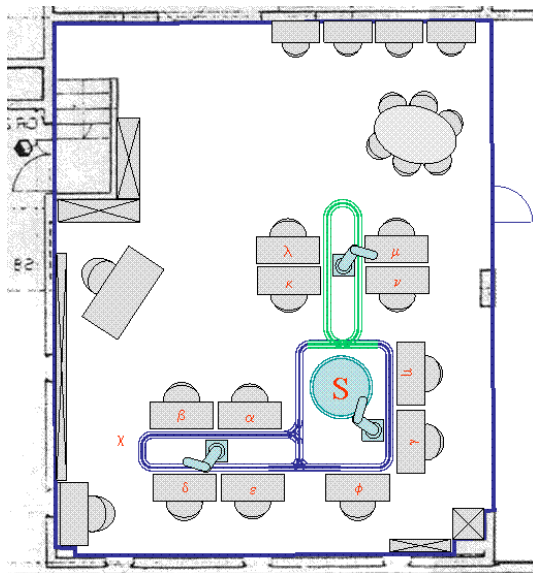


Figure 101 : Plan d'ensemble de la Plateforme Polyvalente de Production et vue d'une boucle de transitique Montrac

- **Mise en place de l'interopérabilité *via* HLA**

Une première version du système de pilotage de la plateforme P³ utilisant HLA est d'ores et déjà opérationnelle. Il

s'agit d'un HMES (*Holonic Manufacturing Execution System*), où les holons en interaction dans le système manufacturier réel sont pilotés par leurs *alter egos* informationnels et décisionnels. Les I_holons sont en interaction via Open HLA, un *Run Time Infrastructure* open source respectant la norme IEEE 1516-2. L'ensemble des fédérés EPA forment un système informatique ambiant et isoarchique permettant aux I_Holons d'assurer le pilotage de leur M_Holon.

Cette première maquette de PROSIS fonctionne pour l'instant en mode HLA 'simulation en temps réel'. Cela signifie que le temps défile de manière constante durant l'exécution de la simulation, soit selon l'écoulement temporel naturel, soit en mode accéléré (c'est-à-dire proportionnellement à un facteur d'accélération). Ce mode permet le pilotage en temps réel du système opérant. Toutefois, si la simulation est trop longue, la simulation accélérée restera toujours longue.

Il existe dans HLA un mode de 'simulation à évènement discret' à mettre en œuvre suivant des règles de synchronisation conservative. Comme dans un SED classique, il est donc possible d'avancer plus rapidement dans le temps, en sautant d'évènement en évènement.

La validation de cette approche se fera par expérimentations *via* un environnement de simulation distribuée. Nous montrerons comment l'utilisation conjointe des technologies RFID et Wireless assurent la cohérence de chaque holon et permettent de fiabiliser le processus de génération des consignes de pilotage, tout en le rendant totalement tolérant aux aléas et aux perturbations, y compris celles d'origine humaine.

- **Mise en place d'un observateur - évaluateur de performance**

Toutes les opérations de production font l'objet dans la plateforme P³ d'un suivi précis obtenu par lecture de tags RFID fixés sur les produits et les conteneurs circulant entre les différents postes de travail.

L'utilisation conjointe d'un même outil de mesure et d'évaluation pour la formation d'ingénieur en organisation industrielle et pour la recherche présente un intérêt fondamental pour la recherche : il s'agira en fait de pouvoir comparer les méthodes conventionnelles avec nos solutions innovantes de pilotage.

La démarche à mettre en œuvre pour l'étude et la réalisation de cet observateur, illustrée en figure 102, concerne :

- la définition des différents indicateurs à implanter,
- la configuration du poste opérateur,
- la modélisation puis l'acquisition *via* coupleurs RFID des données brutes sur le poste opérateur,
- le calcul des indicateurs locaux sur les postes opérateur,
- le transfert de données sur le poste central,
- calcul de l'agrégation donnant les indicateurs de haut niveau du Tableau de Bord atelier

analyseur de performances, via l'observation des flux par coupleurs RFID :

- observation des flux d'encours : $\{ \langle WIP_{jk}, C_x, d_i \rangle \}$,
- observation des déplacements de navettes : $\{ \langle N_y, C_x, d_i \rangle \}$...
- construction Temps Réel d'indicateurs : $\{ IP_p \}$.

agrégation de performances → performance globale & TdB :

- l'activité des Ressources (rendement, productivité...) $\{ IGR_q \}$,
- l'état d'avancement des OF $\{ IGO_z \}$,
- la charge dans l'usine, par poste ou par fonction,
- le coût de réalisation ou de production d'un article, $\{ \langle WIP_{jk}, C_x, d_i \rangle \}$ $\{ \langle N_y, C_x, d_i \rangle \}$...
- la traçabilité exacte pour chaque objet produit,
- la réactualisation en temps réel du planning,
- l'agrégation d'indicateurs globaux → TdB de synthèse...

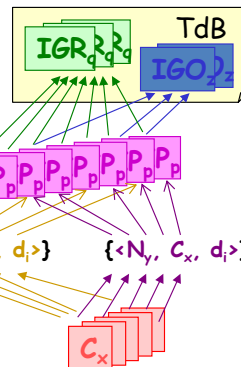


Figure 102 : Principe d'agrégation pour la construction d'un tableau de bord pour l'évaluation de performance

• Mise en place et évaluation de nouveaux critères pour l'aide à la décision multicritère

L'aide à la décision multicritère présente un énorme avantage par rapport à d'autres approches : c'est sa flexibilité. En effet, il suffit de changer les critères et/ou les indicateurs et/ou leurs pondérations pour orienter différemment l'obtention du résultat.

Il y a là un champ d'études considérable : quels nouveaux critères tester ? Quels jeux de paramètres mènent à telle ou telle stratégie, et est-ce que ce jeu présente un caractère standard, c'est-à-dire qu'il peut être appliqué *a priori* comme règle de décision, quelque soit le système de production, si on souhaite voir mise en œuvre la stratégie associée.

Autre questionnement tout aussi intéressant : quels types de stratégies de pilotage peuvent être développées ? Les nouveaux besoins émergents en production, tels que la personnalisation de masse ou l'approche lean peuvent-ils être plus facilement atteints ? En particulier, nous développerons l'idée d'un pilotage HVFV (haute variété, faible volume) selon une approche flux tirés, sur lequel nous avons commencé à travailler (Ounnar & Pujo 2009).

Parmi les nouveaux intérêts des différents holons pouvant être pris en considération (figure 103, qui peut être mise en correspondance avec la figure 93), nous évoquerons ici deux idées concernant principalement le Holon Ordre.

Une première idée concerne la production de produits liés par une nomenclature d'assemblage. Produire une partie des produits nécessaires à une étape d'assemblage ne sert à rien tant que leur totalité n'est pas atteinte. Aussi, nous pouvons envisager un critère visant à assurer la synchronisation des livraisons de produits liés et la fiabilisation des dates de livraison à l'unité d'assemblage. Ce critère 'Synchronisation multi-produits' peut être mis en œuvre via des informations attachées aux HO concernés par cette nomenclature et peut s'inspirer au niveau des calculs nécessaires à l'élaboration des indicateurs aux travaux de Pascal BLANC (Blanc 2006).

Une autre idée consiste à prendre en compte les retards de livraison. A ce niveau, un retard effectif est facile à détecter pour le HO correspondant. C'est un peu plus délicat pour un retard envisagé : en effet, PROSIS fonctionne sans prévisionnel, et il est donc difficile de se projeter dans l'avenir. En fait, cette difficulté est levée par l'existence du Holon Simulation. Ce dernier, sur lequel nous reviendrons, effectue une simulation du fonctionnement sur un horizon proche. Il ne s'agit plus d'un ordonnancement prévisionnel, mais d'une estimation fortement probable de ce qui va se passer. S'il est détecté à cette occasion un retard de livraison devant survenir ultérieurement, il est encore tant d'essayer d'agir en améliorant le classement du produit concerné, afin de tenter de supprimer le retard.

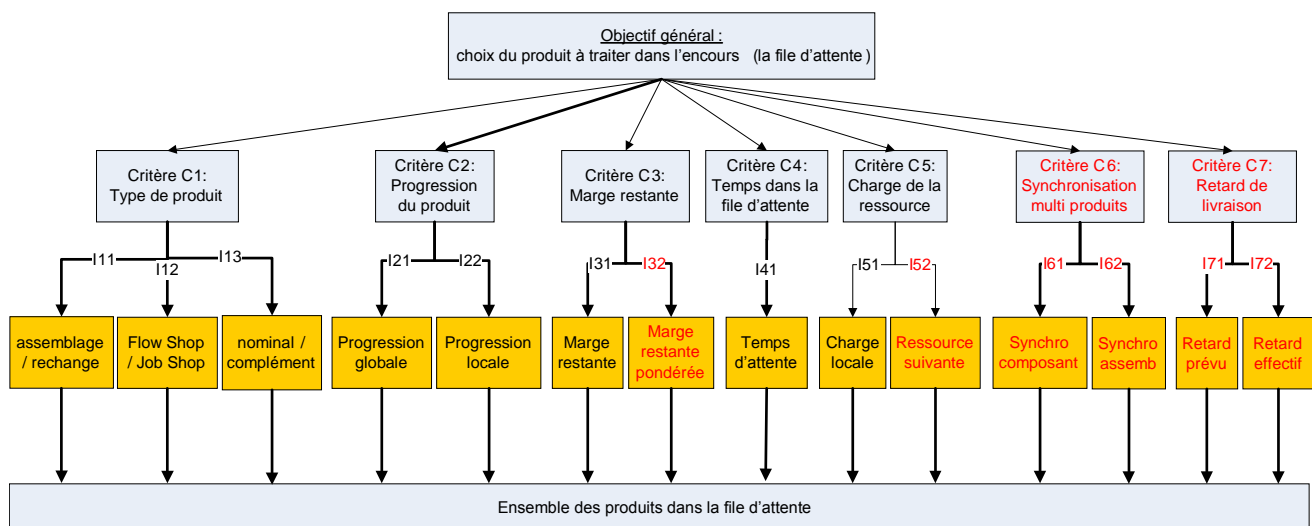


Figure 103 : Structure de décision multicritère : intégration de nouveaux indicateurs et critères

La maquette en cours de développement permet tout à fait de modifier à la demande le service ambiant d'analyse multicritère, en la configurant au cas par cas, au besoin ressource par ressource. En cela, même sans rajouter de nouveaux critères et/ou indicateurs, nous pouvons améliorer les résultats précédemment obtenus.

4.3. Optimisation et pro-activité via PROSIS

A moyen terme, quelques idées s'offrent comme étant des axes de recherche potentiellement prometteurs. Vis-à-vis de l'usage de l'aide à la décision multicritère, il s'agit par exemple d'affiner le paramétrage de l'algorithme pour améliorer la performance de la solution obtenue. Ceci peut être effectué une fois, lors de la configuration initiale à partir de la configuration proposée par expertise humaine.

Une autre idée consiste à introduire de manière approfondie l'assistance par la simulation dans l'aide à la prise de décision multicritère en ligne. Pour cela, un certain nombre de critères issus de la performance projetée doit être introduit dans la structure de décision multicritère, et en amont, les mécanismes de simulation doivent être développés.

La suite logique consiste à associer ces deux idées pour aller vers un pilotage adaptatif, où la configuration de l'algorithme d'aide à la décision multicritère est en permanence optimisée en fonction des résultats obtenus dans un passé proche et des projections faites par simulation sur un futur proche.

Enfin, à plus long terme, deux actions sont envisagées.

La première consiste à utiliser les techniques de détection appliquées en Automatique pour la surveillance d'un signal de capteur pour surveiller l'historique de chaque indicateur, et détecter ainsi des écarts, des dérives... ainsi que tout autre comportement susceptible d'indiquer un dysfonctionnement.

Enfin, il est envisagé de traiter des flux de plus en plus complexes, en développant au niveau des HO les notions de fractionnement et de chevauchement pour aboutir *in fine* à une gestion de production de type '*one part flow*'.

- **Optimisation du paramétrage des méthodes d'aide à la décision multicritère**

Du paramétrage de l'algorithme d'aide à la décision multicritère AHP ou ANP dépend la qualité de la solution de pilotage proposée, comme nous l'avons vu au paragraphe 2.7.

La pratique généralement admise dans la communauté AHP est que ce paramétrage est affaire d'experts. Toutefois, dans notre cas d'application, cette solution peut être multi évaluée au regard d'une batterie d'indicateurs de performance.

Par ailleurs, l'avis d'un expert n'est pas forcément non améliorable vis-à-vis d'un sous ensemble d'indicateurs, choisis pour mettre en lumière tel ou tel aspect d'une stratégie de pilotage. Nous souhaitons explorer le voisinage de la solution proposée par l'expert, en vue de trouver une amélioration sensible des performances obtenues. Il s'agit donc de développer une méta heuristique de type 'algorithme génétique' pour tester des configurations de paramètres proches de celle proposée par l'expert, afin de chercher à améliorer le résultat de l'aide à la décision.

Les algorithmes génétiques font partie des algorithmes évolutionnaires, qui sont une famille d'algorithmes s'inspirant de la théorie de l'évolution pour résoudre des problèmes divers. Ils font ainsi évoluer un ensemble de solutions à un problème donné, dans l'optique de trouver les meilleurs résultats. Ce sont des algorithmes stochastiques, car ils utilisent itérativement des processus aléatoires. Ils permettent donc d'obtenir une solution convenable (et non une solution optimale exacte) dans un temps acceptable.

Pour développer l'algorithme génétique pour l'optimisation du paramétrage de la méthode d'aide à la décision multicritère, il faut trouver une forme générique de modélisation des chromosomes, définir et tester l'efficacité des différents opérateurs de croisement, mutation, sélection, définir les différents critères d'arrêts et définir la fonction de fitness. Cette dernière passe obligatoirement dans notre cas par l'expérimentation en simulation *via* le système de pilotage PROSIS, et l'utilisation du jeu d'indicateurs *ad hoc*.

Cette activité de recherche est déjà entamée avec une thèse ayant débuté début 2009 et un partenariat industriel avec la société InterVascular, qui propose comme cadre d'étude une ligne de production de prothèses chirurgicales fonctionnant en salle blanche.

• Recherche de la pro-activité par la simulation

L'axe de recherche présenté ici s'inscrit dans la suite d'une étude sur l'assistance au pilotage d'atelier par la simulation, afin d'obtenir un système proactif de pilotage (Pujo et al. 2004). Cette étude s'inscrivait dans la perspective d'une aide à la décision auprès d'opérateurs sur ligne 'Just In Time' travaillant sur des plannings multi colonnes, et devant parfois effectuer des choix de production sans maîtriser complètement les conséquences de ces choix.

Afin d'intégrer des propriétés de pro-activité dans notre approche de pilotage isoarchique, nous proposons d'intégrer un Holon Simulation qui travaillera de concert avec les Holons Produit, Holons Ressource et Holons Ordre pour explorer le futur proche et estimer des indicateurs de performance.

Ceci permettra d'évaluer le comportement futur estimé du système de production et de détecter de manière anticipée d'éventuelles perturbations non encore apparues (figure 104).

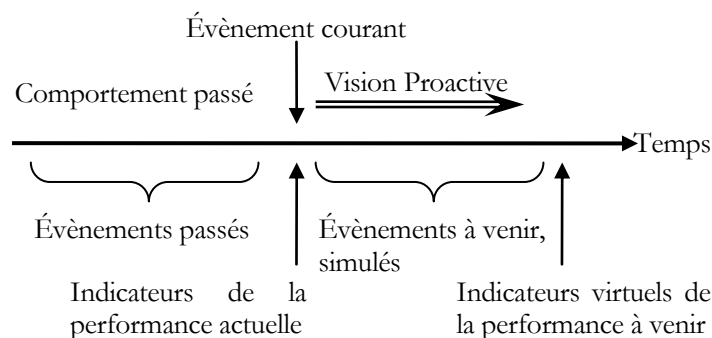


Figure 104 : Pilotage proactif

Un Holon Simulation n'a donc pas comme objectif de contribuer directement à la prise de décision pour le pilotage du système de production. Il s'agit, à partir de l'état réel du système de production, obtenu par l'écoute et l'analyse des interactions entre tous les autres Holons, de simuler l'évolution du système de production sur un horizon 'proche', et de fournir ainsi des indications relatives à l'évolution de ce système de production. Ce Holon ne contribue pas à l'auto organisation mais facilite le pilotage : il confère au pilotage des propriétés proactives relatives à l'occurrence d'apparition probable ou possible de futurs dysfonctionnements.

Ce Holon Simulation se différencie du Holon Staff de PROSA par le fait qu'en aucun cas, le Holon Simulation ne sera consulté par les autres holons Produit, Ressource ou Ordre pour proposer une solution globale d'inspiration centralisée, ce qui est le cas du Holon Staff. Ce dernier, en cas d'impossibilité d'obtenir une solution par l'interaction entre les holons de base, est placé en situation d'arbitre, et propose une solution qu'il aura obtenue via un

algorithme d'ordonnancement centralisé. Même s'il ne s'agit que d'une proposition, les autres holons n'ont pas vraiment d'autre choix que d'exécuter... C'est une situation de pilotage hétérarchique où le holon staff est en position hiérarchique. Le Holon Simulation a un tout autre objectif : celui d'aider à la compréhension et à l'évaluation du comportement de l'atelier.

Ce résultat peut être utilisé à deux niveaux.

Premièrement, cela peut alimenter certains indicateurs qui seront ensuite utilisés dans la recherche du compromis via le service ambiant d'aide à la décision multicritère.

En second lieu, cela peut également contribuer à l'appréhension, à la compréhension et/ou à l'évaluation du fonctionnement du système de production par le personnel qui le compose. Effectivement, il y a comme dans chaque atelier des compagnons travaillant sur les machines et un responsable d'atelier. Du fait du caractère temps réel et auto organisé du pilotage isoarchique des tâches, ce dernier aura des difficultés pour assurer son rôle et appréhender seul toutes les données en jeu. En effet, il ne peut pas s'appuyer sur un planning prévisionnel, qui, même s'il devient rapidement faux voire caduque dès l'apparition d'éléments perturbants, reste fortement structurant et rassurant. Un objectif du Holon Simulation est donc de fournir au responsable d'atelier et aux compagnons une vision la plus probable possible du devenir de l'atelier, aux événements perturbateurs non encore apparus près. Grâce à cela, le responsable d'atelier peut facilement observer le déroulement des tâches dans l'atelier. Par sa capacité d'analyse et son expérience, il peut observer, *via* la simulation, des situations problématiques et prendre des décisions de pilotage de haut niveau (par exemple, favoriser le passage d'un produit sur lequel il y a un problème potentiel ultérieur, ou modifier le paramétrage AHP concernant un HR, un type de HP ou de HO) de manière anticipée : le Holon Simulation amène donc bien une contribution pour favoriser la pro activité.

Les différents modèles de simulation des holons, élaborés selon le formalisme *Discret Event Specification* (DEVS), seront associés directement à chaque I_holon et puiseront leurs données initiales dans les variables d'état de ces I_holons. La mise en œuvre de la simulation de son avenir proche par chaque holon sera alors réalisée par un service ambiant *ad hoc* de simulation, supporté par l'EPA associée, sur déclenchement du Holon Simulation qui gère pour l'ensemble de l'isoarchie. Le modèle de simulation global sera en fait distribué sur tous les holons et la cohérence temporelle de cette simulation à événements discrets sera assurée *via* HLA. L'association entre le formalisme DEVS et l'architecture de haut niveau HLA est une technique que nous pratiquons déjà depuis plusieurs années au LSIS (Pujo *et al.* 2004, Ounnar *et al.* 2004, Zacharewicz *et al.* 2006, Pujo *et al.* 2006, Zacharewicz *et al.* 2009). Elle permet de respecter les relations de causalité temporelles lors de la simulation, HLA proposant des mécanismes de gestion et d'avancement du temps, avec les algorithmes de synchronisation de simulation distribuée (optimistes et pessimistes) (Fujimoto 1998), qui permettent d'interconnecter directement des modèles DEVS distants.

- **Optimisation proactive du pilotage**

Nous parlerons d'optimisation proactive du pilotage lorsqu'il y aura changement automatique de politique de pilotage en fonction des résultats obtenus ou supposés à venir. L'objectif est alors d'adapter en ligne les règles de décision de pilotage, afin de conserver ou d'améliorer un niveau global de performance. Ce changement s'obtient en modifiant les paramètres de la méthode d'aide à la décision du service ambiant d'optimisation. La décision de changement peut être prise au regard des performances atteintes, c'est-à-dire selon la valeur observée des indicateurs (indicateurs directs ou indicateurs agrégés).

Deux approches peuvent être envisagées pour mener à bien le choix de la nouvelle politique de pilotage.

Dans la première approche, le choix entre ces différentes stratégies est dynamiquement et régulièrement effectué à l'initiative des HO, qui pour cela utilisent le service ambiant d'une analyse multicritère AHP configurée de manière *ad hoc* et permettant de choisir parmi plusieurs configurations de paramètres pré établis, qui sont les alternatives qu'il faut classer. Cela correspond alors à un pilotage multicritère au niveau tactique. La structure hiérarchique de décision est alors construite en fonction des impératifs de production et des performances atteintes sous la forme d'indicateurs de performance spécialisés. Les alternatives sont les différents comportements pré configurés pour l'utilisation de l'algorithme AHP au niveau opérationnel. Elles peuvent être testées virtuellement et évaluées. C'est l'alternative qui aurait été la plus efficace sur le passé proche qui sera choisie et qui donne le paramétrage du système

de pilotage multicritère pour le futur proche.

La seconde approche utilise le principe de continuité : ce qui vient de se passer est le meilleur indicateur sur ce qui risque de se passer dans l'immédiat, et il faut rechercher, à partir de la configuration actuelle qui vient d'être utilisée, une configuration voisine qui aurait pu donner de meilleurs résultats. Pour cela, la méthode d'aide à la décision multicritère permettant le pilotage opérationnel va être amené à évoluer sous l'action d'une méta heuristique de type 'algorithme génétique', testant en ligne des configurations de paramètres proches de celle en cours de validité, afin de chercher à améliorer le résultat de l'aide à la décision. Il s'agit donc d'un calcul proche de celui effectué pour optimiser initialement les mêmes paramètres, mais effectué cette fois-ci en ligne.

Nous nous plaçons dans les deux cas à un haut niveau de pilotage, que nous pourrions qualifier de pilotage du pilotage ou de pilotage tactique : l'optimisation des paramètres de configuration du pilotage au niveau tactique donne un caractère auto-adaptatif au pilotage opérationnel. Par ailleurs, la pertinence du changement proposé peut être validée par simulation sur un horizon proche avant de devenir effectif : il s'agit de vérifier que la simulation avec les nouveaux paramètres donne de meilleurs résultats que la simulation avec les paramètres en cours.

- **Détection des ruptures de comportement en pilotage**

Le déclenchement des services de pilotage tactique peut être lui aussi optimisé. Plutôt qu'un déclenchement systématique ou périodique, tel que précédemment évoqué, il nous faut envisager un déclenchement sur événement, plus économique en temps de calcul. Ces événements déclencheurs peuvent être de deux natures : soit ils montrent un changement brutal de comportement du système de production, avec par exemple un écart apparaissant brusquement, soit ils révèlent d'une dérive progressive. Au travers du système d'évaluation de performance du système de production, l'observation des divers indicateurs de performance liés aux ressources et aux produits, et surtout des historiques montrant leurs évolutions est très intéressante, car porteuse de sens et révélatrice d'événements déclencheurs.

Nous sommes dans un cas similaire à celui de l'observation en Automatique de signaux capteur, afin de procéder à de la détection de pannes, voire même à leur localisation et à leur diagnostic. Nous pouvons d'ailleurs remarquer qu'un indicateur en Productique a un peu le même rôle qu'un capteur en Automatique.

La détection automatique des variations d'indicateurs indique des dysfonctionnements dans le système de production et permet soit de générer des alertes, soit de déclencher un ajustement des paramètres de pilotage, peut-elle être envisager, par exemple en mettant en œuvre une approche par résidus.

En Automatique, cela est possible, car il existe des possibilités de modéliser mathématiquement le système observé, et le calcul des résidus est réalisable. Dans notre cas, il faut envisager l'utilisation de méthodes d'obtention des résidus sans modèle, où le système de production est vu comme une boîte noire.

Dans ce cas, l'utilisation d'un modèle de simulation pourrait remplir ce rôle. Il y a là un vaste champ à explorer...

- **Complexification des flux**

Nous montrerons pour conclure comment PROSIS ouvre un large panorama de possibilités de traitement et de gestion des flux manufacturiers, concernant notamment le chevauchement des opérations, le fractionnement des lots, ceci ouvrant à l'étude de stratégies de type '*one part flow*' ou flux unitaire tiré.

Parmi les différentes configurations du mécanisme de choix multicritère, il est possible de favoriser des comportements respectant l'intégrité des lots, ou au contraire d'autoriser le fractionnement pour avoir des tailles de lots de transport différentes des tailles de lots de production ou pour résorber l'apparition d'un goulet d'étranglement, ou enfin de systématiser le chevauchement pour accélérer les flux.

Examinons tout d'abord le chevauchement et le fractionnement-regroupement dynamiques de lots. Soit n , la taille du lot. Pour bénéficier des avantages de la production par lots sans en subir les inconvénients, il s'agit de conduire les transferts de produits entre ressources par quantité réduite q , mais de regrouper les produits par référence au

sein de leurs encours respectifs. Nous noterons que q est nettement inférieur à n et que $q \geq 1$.

Lorsque le traitement d'un groupe de q HP est achevé sur un HR, le I_{ordre} correspondant est décrémenté de q et le groupe est transféré : c'est le lot de transfert. A la réception des M_{produits} , le I_{ordre} correspondant au HR suivant est incrémenté d'autant. Ceci correspond à une généralisation de la notion de chevauchement de lots. La limite $q=1$ correspond quasiment au cas du '*one part flow*', et dans ce cas, il vaut mieux générer un HO propre à chaque produit...

Dans son principe, le chevauchement consiste à commencer le traitement d'un lot sur une ressource, alors que ce lot n'est pas encore complètement traité par la ressource précédente. Cette technique permet de réduire les temps de cycle et les stocks d'encours. En fait, il s'agit bien d'un même HO qui se trouve à cheval sur 2 (ou plusieurs) ressources. Cette pratique peut être parfaitement maîtrisée par le clonage du HO : les HO amont et aval gardent par exemple les mêmes dates de livraison. Bien entendu, il faut que la somme de l'effectif des Holons Ordre clonés soit égale à l'effectif du Holon Ordre relatif au lot initial.

Ceci est possible à condition d'assurer dans les I_{ordre} un comptage et un décomptage rigoureux des effectifs, via le service ambiant de lecture des IDTags des M_{produits} en situation d'entrée/sortie du poste de travail. Gérer l'intégrité de ce service est complexe, car il faut gérer les périodes transitoires durant lesquelles les M_{produits} sont acheminés de poste à poste et où ils n'apparaissent dans aucun effectif. Cette technique permet d'intégrer des dispositifs de surveillance des flux, fonctionnant par interaction directe entre les HO clonés et visant à fiabiliser les opérations de transitique. Les Holons Ressource nomades, en charge de ces tâches de transitique, sont alors également en interaction avec les Holons Ordre clonés, et les contrôles de sécurité du flux de Holons Produits intègrent les lectures / écritures adéquates de Tags ID, *via* les coupleurs RFID.

Le fractionnement d'un lot a des objectifs différents : Il peut s'agir de découpler la taille des lots de fabrication de celle des lots de transfert, afin de faciliter les transferts et de diminuer les niveaux de stock, ou de séparer le lot en plusieurs parties pour exploiter la possibilité d'utiliser des ressources parallèles. Dans cet objectif, il faut organiser le découpage du HO en j HO', la somme des effectifs des j HO' étant égale à l'effectif du HO et les HP étant nominativement affectés dans un seul HO'. Cette problématique de comptage et décomptage des effectifs et d'affectation utilise le service ambiant 'RFID' assuré par l'EPA. Chaque HO' a ensuite une vie indépendante, en fonction des nouveaux objectifs qui lui sont affectés. Par exemple, il peut y avoir une distribution des dates de livraison, avec des techniques de répartition reprenant les concepts d'un heijunka. Une autre application consiste à spécifier un HR à tous les HP d'un même HO', ce qui engendrera des flux parallèles. Enfin, à l'issue de ces fonctionnements en flux séparés, il faut pouvoir regrouper les HO', pour reconstituer le lot initial HO. Là encore, le contrôle de cohérence via le service ambiant 'RFID' est fondamental.

Enfin, dans l'optique d'une démarche *lean*, une approche '*one part flow*' est un idéal qu'il faut s'efforcer d'atteindre. Il ne peut plus y avoir de chevauchement, puisque le fractionnement est maximum, mais les avantages des deux techniques sont réunis : flux pseudo-continu, stock d'en cours minimal, maîtrise de la cadence, maîtrise de la flexibilité par panachage des produits...

Mais cela fonctionne mal lorsque les temps de transfert sont du même ordre que les temps de travail.

Par ailleurs, quand une cellule traite différents produits avec une variété de gammes, de temps de travail et de temps de réglage, l'approche '*one part flow*' est généralement contre-productive, car trop difficile à gérer. C'est généralement le cas des *Job Shop*.

Ces difficultés peuvent disparaître avec une approche PROSIS et l'usage conjoint des technologies RFID, qui permettent de gérer l'adéquation entre le système d'information et la situation matérielle réelle. Grâce au suivi des ID Tags, le '*one part flow*' peut être automatisée, tant pour sa mise en place que pour sa gestion : les informations relatives au HP et celles relatives au HO" (le HO" étant la projection du Holon Ordre sur un seul produit d'un lot) peuvent être regroupées sur un ID Tag commun, partagé par les 2 holons. Il est ainsi possible d'amener un lot de transfert en entrée d'une cellule où il sera traité en '*one part flow*', puis reconstitué en sortie de la cellule.

Toutes les techniques présentées ci-dessus ne sont possibles que grâce à la dissociation du suivi des produits de celle du suivi des ordres, ce que permet très bien de faire PROSIS.

D'autres types d'opérations sur les Holons Ordre peuvent être gérés, comme par exemple lors des convergences et les divergences de flux.

Typiquement, une activité d'assemblage, en suivant les indications de la nomenclature, consiste à transformer $x.k_i$ HP[i] (produits intermédiaires de rang i dans la nomenclature, appelés produits composants) en un HP[i-1] (produit composé, c'est-à-dire soit un produit intermédiaire de rang $i-1$ dans la nomenclature, soit un produit final lorsque $i-1=0$), selon la formule :

$$HP[i-1] = \sum k_j HP_j[i]$$

avec : $j \in [1, x]$, x le nombre de types de composants entrant dans l'assemblage et k_j le coefficient de montage, c'est-à-dire l'indication du nombre d'unités des produits composants HP[j] nécessaires pour la création d'une unité du produit composé HP[i-1]. Sont également concernés lors de cet assemblage les x HO[j] associés à ces $x.k_j$ HP[j] : vérification des quantités disponibles, actualisation des effectifs relatifs après l'assemblage du produit composé HP[i-1]. Cet assemblage se retrouve projeté au niveau des ID Tags : le produit composé contient tous les ID Tags de ses $x.k_j$ produits composants. La solution choisie consiste à choisir un des $x.k_j$ ID Tags pour servir d'ID Tag du produit composé. Les $(x.k_j - 1)$ autres ID Tags des HP[j] doivent être 'mis en sommeil', c'est-à-dire qu'ils ne servent plus à l'identification du produit complet, mais permettent de garder des informations sur ses composants internes. Au-delà de la traçabilité apparente, il y a une mémoire associée au produit, relative à sa composition interne.

Lors du désassemblage, par exemple en fin de vie du produit ou lors d'une maintenance, les ID Tags des composants peuvent être réactivés et le recyclage ou la réparation des composants peuvent être assurés.

Dans le cas d'une activité de découpe, assimilée généralement à un désassemblage dans les logiciels de gestion de données techniques pour la gestion de production, la problématique est différente. En fait, dans le cas d'un découpage, une matière brute est appelée à devenir un produit fini donné, donc il faut y attacher dès le découpage un HP_j[y] qui suivra tout le traitement des y étapes de production jusqu'à l'obtention du produit final HP[0].

Toutes ces informations doivent être gérées par les holons eux mêmes, en utilisant les services ambiants proposés par les EPA. Ceci fait l'objet de travaux de recherche émergents, une thèse venant de débiter sur cette thématique.

5. RÉFÉRENCES

- ADAM E., MANDIAU R., KOLSKI C., 2000. HOMASCOW: A Holonic Multi-Agent System for Cooperative Work, *In: Proceedings of the 11th International Workshop on Database and Expert Systems Applications (DEXA'00)*, pp. 247
- ADAM E., MANDIAU R., KOLSKI C., 2001. Application of a Holonic Multi-Agent System for Cooperative Work to Administrative Processes, *Journal of Applied Systems Studies*, Vol. 2, pp. 100-115
- AGOSTINELLI S., 2001. *Voies de recherche en Sciences de l'Information et de la Communication : le rôle des artefacts et des organisations sociales dans la communication des connaissances*, Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches, Université de Rennes 2
- AGRAWAL S., SENGUPTA R.N., SHANKER K., 2009. Impact of information sharing and lead time on bullwhip effect and on-hand inventory, *European Journal of Operational Research*, Vol. 192 (2), pp. 576-593.
- ALEONARD C., DINDELEUX E., SOENEN R. Conduite des systèmes de production, *Techniques de l'Ingénieur A 8 260-R 7 598*, 1994
- ANSELMETTI B., CHEP A., MOGNOL P., 1995. A Decision-Based Approach: Application To The Automatic Design Of Process Planning, *Production Planning & Control*, Vol. 6 (4), pp. 345-351
- ARCHIMÈDE B., COUDERT T., PRIEM L., Ordonnancement dynamique dans les ateliers de fabrication. Une solution à base d'agents, *Dans : Actes du 3^{ème} Congrès International de Génie Industriel (CIGI99)*, Montréal, Canada, pp. 1523-1532
- ARAI T., AIYAMA Y., SUGI M., OTA J., 2001. Holonic assembly system with Plug and Produce, *Computers in Industry*, Vol. 46 (3), pp. 289-299, doi:10.1016/S0166-3615(01)00111-7
- ARCHIMÈDE B., 1991. *Conception d'une architecture réactive distribuée et hiérarchisée pour le pilotage des systèmes de production*, Thèse de Doctorat en Sciences, Université de Bordeaux 1, janvier
- ASGHARI B., 1998. *Contribution à la prise en compte du comportement multi-technologique des robots industriels dans le contexte d'une architecture de commande décentralisée*, Thèse de Doctorat en Sciences, Université d'Aix-Marseille III, DIAM, Marseille, octobre
- AVENIER M.J., *Pilotage de l'entreprise et environnement complexe, une aide à la conception d'un pilotage plus effectif*, Thèse de Doctorat d'Etat es Sciences Economiques, Université d'Aix-Marseille III, juillet 1984
- BABICEANU R.F., CHEN F.F., STURGES R.H., (2004). Framework for control of automated material-handling systems using holonic manufacturing approach, *International Journal of Production Research*, Vol. 42 (17), pp. 3551-3564
- BABOLI H.A., 1999. *Contribution à l'élaboration d'une démarche de conception intégrée du système flexible de production en liaison avec la conception intégrée de produits*, Thèse de Doctorat en Sciences, INPG
- BAÏNA S., 2006. *Interopérabilité dirigée par les modèles : une approche orientée produit pour l'interopérabilité des systèmes d'entreprise*. Thèse de Doctorat en Sciences, Université Henry Poincaré, Nancy
- BAÏNA S., PANETTO H., MOREL G., 2006. New paradigms for a product oriented modelling: Case study for traceability. *In: Special issue on Intelligent Product.. Computers In Industry*, Vol. 60, pp. 172-183, ISSN: 0166-3615
- BAJIC E., SALLEZ Y., 2007. Proposition de projet transversal exploratoire du GDR MACS : «Système Contrôlé par le Produit», *Dans : Journées prospectives STP, CNRS, Lyon, 11 & 12 juin*
- BAKER H., 1988. DFMS: a new control structure for FMS, *Computers in Industry*, Vol. 10 (2), pp. 1-9.
- BAKER A. D., 1998. A survey of factory control algorithms that can be implemented in a multi-agent heterarchy: dispatching, scheduling, and pull, *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 17 (4), pp. 297-320.
- BAKHOUYA M., GABER J., KOUKAM A., 2006. Distributed holonic multi-agent system for resource discovery in grids, *Journal on Multiagent and Grid Systems*, Vol. 2 (1), pp. 1-9
- BAL M., HASHEMIPOUR M., MANESH H. F., 2006. Agent-based holonic virtual worlds for design and operations of agile manufacturing systems, *In: Proceedings of 5th International Symposium on Intelligent Manufacturing Systems*, May 29-31, pp. 403-415
- BALASUBRAMANIAN S., BRENNAN R., NORRIE D., 2001. An architecture for metamorphic control of holonic manufacturing systems. *Computers In Industry*, Vol. 46, pp. 13-31
- BALÂTRE J.P., BALÂTRE M., 1991. *Les systèmes distribués – expérience du projet Gothic*, InterEditions, Paris
- BEER S., 1972. *Brain of the Firm*, Penguin Press, London, (trad. française P.U.F., Paris, 1979)
- BERCHET C., 2000. *Modélisation pour la simulation d'un système d'aide au pilotage industriel*, Thèse de Doctorat en Sciences, INPG, Grenoble, décembre

- BERGER T., ZBIB N., SALLEZ Y., TRENTESAUX D., 2008. Product & resource driven control of allocation and routing processes in FMS. *Dans : Actes de la 7^{ème} Conférence Internationale de MOdélisation and SIMulation - MOSIM'08*, Paris – France
- BERTRAND J.C., BRUN-PICARD D., KIEFFER J.P., 1988. Gestion et Pilotage des Systèmes Industriels de Production dans un Contexte d'Architecture Décentralisée, *Dans : Actes du 2^{ème} congrès international de Génie Industriel*, Nancy
- BERTRAND J.C., BRUN-PICARD D., PUJO P., 1990. CIM : vers une mise en oeuvre décentralisée du système de production pour une meilleure intégration des fonctions de conception, production et gestion. *Dans : Actes du Congrès "CIM90 : Productique et Intégration"*, Bordeaux, France.
- BIEMANS F.P., VISSERS C.A., 1991. A system theoretic view of computer integrated manufacturing. *International Journal of Production Research*, Vol. 29 (5), pp. 947-966
- BINDER Z., 1977. *Sur l'organisation et la conduite de systèmes complexes*, Thèse d'État, INPG, Grenoble
- BLANC P., DEMONGODIN I., CASTAGNA P., 2006. A holonic approach for manufacturing control: An industrial application, *In: Proceedings from the 12th IFAC Conference: Information Control Problems in Manufacturing*, 17-19 May 2006, Saint-Etienne, France, pp. 389-394
- BLANC P., *Pilotage par approche holonique d'un système de production de vitres de sécurité feuilletées*, Thèse de Doctorat en Sciences, IRCCyN, Université de Nantes, décembre 2006
- BLANC P., DEMONGODIN I., CASTAGNA P., 2009. A holonic approach for manufacturing execution system design: An industrial application, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol. 21, pp. 315-330
- BONABEAU E., THERAULAZ G., 1994. *Intelligence collective*, Hermès, Paris
- BONGAERTS L., WYNS J., DETAND J., VAN BRUSSEL H., VALCKENAERS P., 1996. Identification of manufacturing holons. *In: Proceedings of the European Workshop for Agent-Oriented Systems in Manufacturing*, Berlin, pp. 57-73.
- BONGAERTS L., MONOSTORI L., MCFARLANE D., KADAR B., 2000. Hierarchy in distributed shop floor control. *Computers In Industry*, Vol. 43, pp. 123-137
- BORANGIU T., RAILEANU S., IVANESCU N., ANTON S., ANTON F.D., DOGAR A.M., 2007. RVHOLON – A holonic control platform for networked robots, *CeEx2007*, pp. 146-1-6, Brasov, Roumanie, 24-26 Octobre
- BORANGIU T., GILBERT P., IVANESCU N.A., ROSU A., 2009. An implementing framework for holonic manufacturing control with multiple robot-vision stations, *EAAI*, Vol. 22, pp. 505-521
- BOUREY J.P., 1988. *Structuration de la partie procédurale du système de commande des cellules de production flexibles dans l'industrie manufacturière*, Thèse de Doctorat en Sciences, Université des Sciences et Techniques de Lille
- Bourrières J.P., P. Baptiste, A. Bernard, P. Lopez, G. Morel, H. Pierreval, M.C. Portmann, 2007. *Comité d'Experts Productique : prospective de recherche*, CNRS, 15 janvier 2007
- BOUSBIA S., 2006. *Proposition d'un système de pilotage hétérarchique évolutif par apprentissage*, Thèse de Doctorat en Sciences, Université de Valenciennes et du Hainaut - Cambrésis, Valenciennes, décembre
- BOSTEL N., 1996. *Méthodes de simulation et d'optimisation appliquées à la gestion opérationnelle des chantiers de transbordement rapide*, Thèse de Doctorat en Sciences, école centrale de Paris, 20 juin
- BOSTEL N., DEJAX P., 1997. Un modèle de simulation pour l'ordonnancement des mouvements des équipements dans un chantier de transbordement rapide fer-fer, *Dans : Actes du 2^{ème} Congrès International Franco-Québécois de Génie Industriel*, Cd Room, Albi.
- BRENNAN R.W., 1998. An Agent-Oriented Architecture for Holonic Manufacturing Control, *In: the First Open Workshop IMS Europe*, Lausanne, Suisse
- BRENNAN R.W., 2001. Holonic and multi-agent systems in industry , *The Knowledge Engineering Review*, Vol. 16, pp. 375-381, doi:10.1017/S0269888901000200
- BRENNAN R.W., NORRIE D.H., 2003. Metrics for evaluating distributed manufacturing control systems, *Computers in Industry*, Vol. 51 (2), pp. 225-235
- BROISSIN N., PUJO P., BERTRAND J.C., 1996. Decentralized Piloting of Transport Systems by Autonomous Vehicles, *In: WAC96*, Montpellier, France, Mai
- BROISSIN N., 1999. *Contribution à l'amélioration de la réactivité des Systèmes de Production Automatisés et Flexibles grâce à un pilotage basé sur une Génération de Tâches Décentralisée*. Thèse de Doctorat en Sciences, Université d'Aix-Marseille III
- BRUN-PICARD D., 1988. *Contribution à l'élaboration d'un modèle de commande décentralisée*. Thèse de Doctorat es Sciences, Université d'Aix-Marseille III

- BRUN-PICARD D., BABOLI H., 1995. Self-scheduling for Flexible Manufacturing Systems : a product-oriented approach, *In: Proceedings from the 13th International Conference on Production Research*, Jerusalem, Israel.
- BRUN-PICARD D., BOUVET H., BABOLI H., BINDER Z., 1997. The product as an active element of distributed production control. *In: Proceedings from the IFAC-IFIP-IMACS Conference on Control of Industrial Systems*, Belfort, 20-22 May.
- BRUN-PICARD D., 2000. Pilotage réactif par le produit, *Dans : Journées du Groupement pour la Recherche en Productique*, ESIA, Annecy, France
- BRUSEY J., MCFARLANE D., 2005. Designing communication protocols for holonic control devices using elementary nets, *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, Vol. 3593, pp. 76-86
- BRYAN T.J., NG, ZHANG J.B., LIN W.J., WONG M.M., LUO M., MA H., 2003. Fast Self-organisation Multi-equipment Control, *In: Proceedings from the 4th IEEE ICCA 2003*, Montreal, Canada, June, Vol. 1, pp. 233-237
- BÜRCKERT H.-J., FISCHER K., VIERKE G., 2000. Holonic Transport Scheduling with TeleTruck, *Journal of Applied Artificial Intelligence*, Vol. 14, pp. 697-725
- BUSMANN S., MÜLLER J., 1993. A Communication Architecture for Cooperating Agents, *Computers and Artificial Intelligence*, Vol. 12 (1), pp. 37-53
- BUSMANN S., 1998. Autonome und Kooperative Produktionssysteme, *Informationstechnik und Technische Informatik*, Vol. 4, pp. 34 –39, R. Oldenbourg Verlag GmbH, München
- BUSMANN S., MCFARLANE D., 2000. Developments in Holonic Production Planning and Control, *Production Planning and Control*, Vol. 11 (6), pp. 522-536
- CARDIN O., 2007. *Apport de la simulation en ligne dans l'aide à la décision pour le pilotage des systèmes de production – application à un système flexible de production*, Thèse de Doctorat en Sciences, IRCCyN, Université de Nantes, octobre
- CARDIN O., CASTAGNA P., CHOVÉ E., 2008. La simulation pour l'aide au pilotage des systèmes contrôlés par le produit. *Dans : Actes de la 7^{ème} Conférence Internationale de MOdélisation and SIMulation - MOSIM'08*, Paris, France
- CARDIN O., CASTAGNA P., 2009. Using online simulation in Holonic Manufacturing Systems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, doi:10.1016/j.engappai.2009.01.006
- CARDON A. 2004. *Modéliser et concevoir une machine pensante*, Vuibert, Paris
- CARMONA J.C., 1990. *Contribution à l'étude et à la réalisation d'un système de commande décentralisée d'un tour industriel*, Thèse de Doctorat en Sciences, Université d'Aix-Marseille III, LAIM, Février
- CASTAGNA P., A. THOMAS, P. BLANC, O. CARDIN, R. PANNEQUIN, H. EL HAOUZI, T. KLEIN, 2008. La simulation pour les systèmes pilotés par le Produit, *In: Simulation pour le pilotage de la chaîne logistique*, Hermès Sciences
- CEA R., 2006. *Contribution à la Modélisation et à la Gestion des Interactions Produit-Processus dans la Chaîne Logistique par l'Approche Produits Communicants*, Thèse de Doctorat en Sciences, Université Henry Poincaré, Nancy
- CHARPENTIER P., F. CHAXEL, A. THOMAS, E. MUHL, 2001. Sur quelques approches de pilotage distribué et leur formalisation, *JESA*, 35 (7-8), p.885-904
- CHARIF Y., SABOURET N., 2006. Protocole d'interaction pour la composition de services dans l'intelligence ambiante. *Dans : Actes des 14^{èmes} Journées Francophones sur les Systèmes Multi-Agents (JFSMA 2006)*, Annecy, France
- CHENG F.T., CHANG C.F., WU S.L., 2004. Development of holonic manufacturing execution systems, *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 15 (2), pp. 253-267
- CHENG F.T., LIN C.T., 2004. A holonic information exchange system for e-Manufacturing, *IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)*, Vol. 3, pp. 2377-2382, Busan, Korea, November 2-6
- CHENG F.T., YANG H.C., LIN J.Y., 2004. Development of Holonic Information Coordination Systems with Failure-Recovery Considerations, *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, Vol. 1 (1), pp. 58-72
- CHEUNG E.H.M., YEUNG R.W.H., NG A.H.C., FUNG R.S.T., 2000. HSCF: A holonic shop floor control framework for flexible manufacturing systems, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 13 (2), pp. 121-138
- CHIRN, J.L., MCFARLANE, D.C., 2000. Application of the holonic component-based approach to the control of a robot assembly cell. *In: Proceedings of the IEEE Conference on Robotics and Automation*, San Francisco.
- CHAXEL F., E. BAJIC, J. RICHARD, 1999. Automotive Vehicules Data Management Based on the Product Holon Paradigm, *IEEE Systems Man & Cybernetics*, Tokyo, Japon, 12-15 Octobre 1999.
- CHOURAQUI E., PORTAFAIX V., 1998. Modelling and Validation of an Industrial Knowledge Based System for

- Quality in Manufacturing Route Sheets”, In: *JDS Journal of Decision Systems*, pp. 121-135, Hermès
- CHRISTENSEN J.H., 1994. Holonic Manufacturing Systems: Initial Architecture and Standards Directions. In: *Proceedings of First European Conference on Holonic Manufacturing Systems*, European HMS Consortium. Hanover
- CHRISTENSEN S., JØRGENSEN J.B., KRISTENSEN, L.M., 1997. Design/CPN - A Computer Tool for Coloured Petri Nets. In: *Proceedings of the Third international Workshop on Tools and Algorithms For Construction and Analysis of Systems* (April 02 - 04, 1997). E. Brinksma, Ed. *Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 1217. Springer-Verlag, London, 209-223.
- CHRISTENSEN J.H., 2000. Basic concepts of IEC 61499, *Fachtagung Verteilte Automatisierung*, Magdeburg
- CHRISTENSEN J.H., 2003. HMS/FB architecture and its implementation, In: *Agent-based manufacturing: Advances in the holonic approach*, pp. 53–87, Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag (S. M. DEEN Ed.), ISBN 3-540-44069-0
- CHRISTENSEN J.H., 2003. *The IEC 61499 Standard: Concepts and Research Tools*, Rockwell Automation
- CHRISTENSEN J.H., 2004. *Automation Modeling, Design and Programming with the IEC 61499 Function Block Standard*, Helsinki University of Technology, June 7-11
- COSENTINO M., GAUD N., GALLAND S., HILAIRE V., KOUKAM A., 2007. A Holonic Metamodel for Agent-Oriented Analysis and Design, In: *Holonic and Multi-Agent Systems for Manufacturing (HoloMAS07)*, *Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 4659, pp. 237-264.
- COSENTINO M., GALLAND S., GAUD N., HILAIRE V., KOUKAM A., 2008. How to control emergence of behaviours in a holarchy. In: *Proc. of Self-Adaptation for Robustness and Cooperation in Holonic Multi-Agent Systems (SARC2008) Workshop at the IEEE Second International Conference on Self-Adaptive and Self-Organizing Systems (SASO 2008)*, Isola di San Servolo (Venice), Italy, October 20-24
- DA SILVEIRA M., 2003. *Sur la distribution avec redondance partielle de modèles à événements discrets pour la supervision de procédés industriels*, Thèse de Doctorat en Sciences, LAAS, Université Paul Sabatier, 16 juillet
- DALENOORT G.J., 1989. The paradigm of self-organization: studies of autonomous systems, in: G.J. Dalenoort (Ed.), *The Paradigm of Self-Organization*, Gordon and Breach, London, pp. 1–22
- DAOUAS T., GHÉRIDA K., MULLER J.P., 1995. Ordonnancement distribué dans un atelier de type Flow Shop, dans : *Actes des 3èmes Journées Francophones LAD-SMA*, Chambéry, pp. 79-90.
- DAVIS R., SMITH R., 1983. Negotiation as a metaphor for distributed problem solving, *Artificial Intelligence*, Vol. 20 (1), pp. 63–109
- DING H., BENYUCEF L., XIE X., HANS C., SCHUMACHER J., 2004. ONE: A New Tool For Supply Chain Network Optimization and Simulation. In: *Proceedings of the 36th Winter Simulation Conference*, pp. 1404-1411.
- DE ANTONI J., BABAU J.P., 2006. SAIA, A model driven method for safe deployment of sensors based applications. In: *Proceedings of MAAS 2006- Workshop on Model and Analysis for Automotive Systems, held in conjunction with 27th IEEE International Real-Time Systems Symposium*, pages 45-48.
- DE PUYDT P.E., 1860. Panarchie, *Revue Trimestrielle*, Bruxelles, Juillet
- DEEN, S.M., 2003. *Agent-Based Manufacturing – Advances in the Holonic Approach*, Springer-Verlag Ed, ISBN 3-540-44069-0.
- DOBRE D., BAJIC E., 2008. Active product modeling for chemical security management based on smart object concept. Dans : *Actes de la 7^{ème} Conférence Internationale de MODélisation and SIMulation - MOSIM'08*, Paris – France
- DOMINICI G., 2008. Holonic Production System to Obtain Flexibility for Customer Satisfaction, *J. Serv. Sci. & Management*, Vol. 1, pp. 251-254
- DROGOUL A., VANBERGUE D., MEURISSE T., 2003. Multi-agent Based Simulation: Where Are the Agents?, (*3rd International Workshop on Multi-Agent-Based Simulation (MABS'02)*) *LNAI*, Vol. 2581, pp. 43-49, Springer-Verlag
- DUCATEL K., BOGDANOWICZ M., SCAPOLLO F., LEIJTEN J., BURGELMAN J.C., 2001. Scenarios For Ambient Intelligence In 2010 - Final Report, *IPTS-Seville, European Communities*, ISBN 92-894-0735-2
- DUDA A. 2003. Ambient Networking. In: *Proceedings of Smart Objects Conference*, Grenoble, France
- DUFFIE N.A., 1988. Non hierarchical control of a manufacturing system. *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 5
- EL HAOUZI H., THOMAS A., PÉTIN J.F., 2007. Contribution to reusability and modularity of manufacturing systems simulation models: Application to distributed control simulation within DFT context. *International Journal of Production Economics*, Vol. 112 (1), pp. 48-61.
- EL HAOUZI H., 2008. *Approche méthodologique pour l'intégration des systèmes contrôlés par le produit dans un environnement de*

- juste-à-temps : Application à l'entreprise TRANE*, Thèse de Doctorat en Sciences, Université Henry Poincaré, Nancy
- EL HAOUZI H., PÉTIN J.F., THOMAS A., 2009. Design and validation of a product driven control system based on a six-sigma methodology and discrete event simulation; *Production Planning and Control*, <http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00341768/fr/>.
- ERIKSON D.M., 1997. A Principal Exposition of Jean-Louis Le Moigne's Systemic Theory. *Cybernetics & Human Knowing*, Vol. 4 (2).
- ESPINASSE B., PICOLET G. & CHOURAQUI E. 1997. Negotiation support systems: A multi-criteria and multi-agent approach. *European Journal of Operational Research*, Vol. 103 (2), pp. 389-409
- EYRAUD F., D'IRIBARNE A., MAURICE M., RYCHENER F., 1988, L'apprentissage par les entreprises des technologies flexibles : une recomposition d'acteurs et l'émergence de nouvelles professionnalités, *Dans : L'Après-taylorisme : Nouvelles formes de rationalisation dans l'entreprise en France et en Allemagne* (P. COHENDET, T. MAISCH, M. HOLLARD et P. VELTZ (dir.)), Économica, Paris, pp. 163-178.
- FERBER J., 1995. *Les systèmes multi-agents – vers une intelligence collective*, InterEditions, Paris, ISBN 2-7296-0572-X.
- FERBER J., 1999. *Multi-Agent System: An Introduction to Distributed Artificial Intelligence*, Addison Wesley.
- FILLATREAU P., BERNARDA F.X., AZTIRIAC A., SAÉNZ DE ARGANDOÑA E., GARCÍA B. C., ARANAC N. & IZAGUIRREC A., 2008. Sheet metal forming global control system based on artificial vision system and force-acoustic sensors, *J Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, DOI:10.1016/j.rcim.2008.03.016
- FIPA, 2002. *FIPA Contract Net Interaction Protocol Specification*, Foundation for Intelligent Physical Agents, <http://www.fipa.org/specs/fipa0029/index.html>
- FIPA, 2003. Foundation for Intelligent Physical Agents web site, <http://www.fipa.org/>
- FISCHER K., 1999. Agent-Based Design of Holonic Manufacturing Systems, *Journal of Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 27 (1-2), pp. 3-13
- FISCHER K., SCHILLO M., SIEKMANN J., 2003. Holonic Multiagent Systems: A Foundation for the Organisation of Multiagent Systems, *In: Proceedings of the HoloMAS 2003*
- FISCHER K., 2005. Self-organisation in Holonic Multiagent Systems, (*Mechanizing Mathematical Reasoning*) *LNAI*, Vol. 2605, pp. 543–563
- FLETCHER M., 2002. *JACK: A System for Building Holonic Coalitions*, Defense Technical Information Center OAI-PMH Repository
- FLETCHER M., BRENNAN R. W., 2002. Designing an Integrated Holonic Scheduler with JACK, *In: Proceedings of the 13th International Workshop on Database and Expert Systems Applications (DEXA'02)*, pp. 633, Aix en Provence, France
- FORRESTER J.W., 1961. *Industrial Dynamics*, M.I.T. Press, Cambridge, Massachusetts, 1961
- FORTHOFFER J., 1996. *Le déploiement du transport intermodal dans l'espace multinational sud-rhénan*, Thèse de Doctorat, Université de Paris IV - Sorbonne, janvier
- FUJIMOTO R. M., 1998. Time Management in the High Level Architecture. *Transaction of the SCS Simulation*, Vol. 71, pp 388-400.
- FUJIMURA K., 1995. Time-minimum routes in time dependent networks, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 11 (3), June
- FUJITA N., 2001. Holonic controller and assembly task planning, *In: Proceedings of the IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning*, pp. 67-72
- GENESTE L., 1995. *Outils d'aide à la décision pour le pilotage d'atelier*, Thèse de Doctorat en Sciences, Université Paul Sabatier de Toulouse, 5 janvier
- GERARD S., BABAU J.P., CHAMPEAU J., 2005. *Model Driven Engineering for Distributed Real-Time Embedded Systems*. Hermes Science Publishing, ISBN 1905209320
- GERBER C., SIEKMANN J., VIERKE G., 1999. *Holonic Multi-Agent Systems*, Tech. Rep. No. RR-99-03, Research Center for Artificial Intelligence (DFKI GmbH), Saarbrücken
- GIARD V., 1988. *Gestion de la production*, Economica
- GIEBELS M.M.T., KALS H.J.J., ZIJM W.H.M., 2001. Buildings holarchies for concurrent manufacturing planning and control in EtoPlan, *Computers in Industry*, Vol. 46, pp. 301-314
- GIRET A., BOTTI V., 2004. Holons and Agents, *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 15, pp. 645–659
- GIRET A., BOTTI V., 2009. Engineering Holonic Manufacturing Systems, *Computers in Industry*, Vol. 60, pp. 428-440

- GOU L., LUH P.B., KYOYA Y., 1998. Holonic manufacturing scheduling: architecture, cooperation mechanism, and implementation, *Computers in Industry*, Vol. 37 (3), pp. 213-231
- GOUYON D., 2004. *Contrôle par le produit des systèmes d'exécution de la production : apport des techniques de synthèse*, Thèse de Doctorat en Sciences, Université Henry Poincaré, Nancy, décembre
- GOUYON D., PÉTIN J.F., MOREL G., 2007. A Product-Driven Reconfigurable Control for Shop Floor Systems. *Studies in Informatics and Control*, Vol. 16 (1)
- GOUYON D., DAVID M., 2008. Implantation d'un contrôle par le produit à l'aide de réseaux de capteurs sans fil – validation par émulation d'un environnement de production. Dans : *Actes de la 7^{ème} Conférence Internationale de MODélisation and SIMulation - MOSIM'08*, Paris – France
- GOZZI A., PAOLUCCI M., BOCCALATTE A., 2002. A Multi-Agent Approach to Support Dynamic Scheduling Decisions, In: *Proceedings of the 7th International Symposium on Computers and Communications (ISCC'02)*, pp. 983-988, DOI 10.1109/ISCC.2002.1021791
- GRABOT B., HUGUET P., 1996. Reference models and object-oriented method for reuse in production activity control system design. *Computer in Industry*, Vol. 32, pp. 17-31
- GRABOT B., HUGUET P., 1997. Modèles de référence et méthode orientée-objet pour la conception de systèmes de pilotage d'atelier. *JESA*, Vol. 31 (1), pp. 95-124
- GRIMM V., RAILSBACK S., 2005. *Individual-based Modeling and Ecology*, Princeton University Press
- GUITOUNI A., MARTEL J.M., VINCKE PH., 1999. *Un Cadre de Référence pour le Choix d'une Procédure d'Agrégation Multicritère*. Document de travail, FSA-1999-013, Université Laval, Québec, Canada.
- GUNASEKARAN A., 2001. *Agile manufacturing: the 21st century competitive strategy*, Elsevier.
- HADJ YOUSSEF K., 2003. Pilotage des systèmes de production à flux mixtes : production à la commande et production par anticipation, Thèse de Doctorat en Sciences, Ecole Centrale de Paris, décembre
- HASEGAWA T., GOU L., TAMURA S., LUH P.B., OBLAK J.M., 1994. Holonic Planning and Scheduling Architecture for Manufacturing, In: *Proceedings of Int. Conf. on Cooperating Knowledge-Based Systems*, Juin
- HERAGU S.S., GRAVES R.J., KIM B.I., ST ONGE A.S., 2002. Intelligent Agent Based Framework for Manufacturing Systems Control. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics – Part A*, Vol. 32 (5), pp. 560-573
- HIRCH B.E., SCHUMACHER J., ESCHENBACHER J., JANSSON K., OLLUS M., KARVONEN I., 2001. Extended Products: Observatory of Current Research and Development Trends. In: *E-work and E-commerce : novel solutions & practices for a global networked economy*, B Stanford-Smith & E. Chirola (Eds.), IOS Press. pp. 417-423
- HMS, 2000. Holonic Manufacturing Systems consortium web site, <http://hms.ifw.uni-hannover.de>, 2000.
- HOPFIELD J.J., TANK D.W., 1985. Neural Computation of Decisions in Optimization Problems, *Biological Cybernetics*, Vol. 52, pp. 141-152
- HRIBERNIK K.A., RABE L., THOBEN K-D., SCHUMACHER J., 2006. The product avatar as a product-instance-centric information management concept, *International Journal of Product Lifecycle Management*, Vol. 1 (4) pp. 367 - 379, DOI: 10.1504/IJPLM.2006.011055
- HSIEH F.S., 2008. Holarchy formation and optimization in holonic manufacturing systems with contract net, *Automatica*, Vol. 44 (4), pp. 959-970
- HUANG H.M., 1996. Intelligent Manufacturing System Control: Reference Model and Initial Implementation, In: *the 35th IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*, Kobe, Japan, Décembre.
- HUANG X.M., WANG Y.C., TAN D.L., ZHAO M.Y., 2004. Study on integration and modeling of simulation platform of reconfigurable assembly line, In: *Proceedings of the Fifth World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA'04)*, 15-19 june, Vol. 3, pp. 2768-2772, Hangzhou, China
- HUANG X.M., WANG Y.C., TAN D.L., ZHAO M.Y., MENG F., 2004. Theoretical analyze and implementation method of reconfigurable assembly line based on agent and holon, In: *Proceedings of the Fifth World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA'04)*, 15-19 june, Vol. 3, pp. 2830- 2833, Hangzhou, China
- HUANG G.Q., ZHANG Y.F., JIANG P.Y., 2007. RFID-based wireless manufacturing for walking-worker assembly islands with fixed-position layouts. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 23 (4), pp. 469-477
- IEC 61131-3:2003. *Programmable controllers – Part 3: Programming languages*, TC/SC 65B Std, ISBN 2-8318-6653-7, Geneva, Switzerland
- IEC 61499:2005. *Function blocks*, TC/SC 65B Std, Geneva, Switzerland

- IEC 61804:2006. *Function blocks (FB) for process control*, TC/SC 65E Std, Geneva, Switzerland
- IEC 62264-1:2003. *Enterprise-control System Integration - Part 1: Models and terminology*, ISO TC 184/SC 5 Std, Geneva, Switzerland
- IEC 62264-2:2004. *Enterprise-control System Integration - Part 2: Model object attributes*, ISO TC 184/SC 5 Std, Geneva, Switzerland
- IEC 62264-3:2007. *Enterprise-control System Integration - Part 3: Activity models of manufacturing operations management*, ISO TC 184/SC 5 Std, Geneva, Switzerland
- IEEE P1516-2, 2000. *Draft Standard for Modeling and Simulation (M&S) High Level Architecture (HLA) - Framework and Rules*, IEEE Standard for Modeling and Simulation.
- IMS, 1997. *4th IFAC Workshop on Intelligent Manufacturing Systems, IMS'97*, July 21-23, Seoul, Korea Proceedings, Seoul National University, PERGAMON, ISBN 0-08-043025-2
- ISO 14649-1:2003. *Industrial automation systems and integration -- Physical device control -- Data model for computerized numerical controllers -- Part 1: Overview and fundamental principles*, ISO TC 184/SC 1 Std, Geneva, Switzerland
- ISO 6983-1:1982. *Numerical control of machines -- Program format and definition of address words -- Part 1: Data format for positioning, line motion and contouring control systems*, ISO TC 184/SC 1 Std, Geneva, Switzerland
- IWAMURA K., OKUBO N., TANIMIZU Y., SUGIMURA N., 2006. Real-time scheduling for holonic manufacturing systems based on estimation of future status, *International Journal of Production Research*, Vol. 44 (18), pp. 3657–3675
- IWAMURA K., SEKI Y., TANIMIZU Y., SUGIMURA N., 2006. A study on a real-time scheduling of holonic manufacturing system – coordination among holons based on multi-objective optimization problem, *Mechatronics for Safety, Security and Dependability in a New Era*, pp. 195-200
- IWAMURA K., NAKANO A., TANIMIZU Y., SUGIMURA N., 2007. A study on a real-time scheduling of holonic manufacturing system – A Study on Real-Time Scheduling for Holonic Manufacturing Systems – Simulation for Estimation of Future Status by Individual Holons, *HoloMAS 2007, LNAI*, Vol. 4659, pp. 205–214
- JALARD B., DEAU D., GUIGNON M., 1990. Les transbordements rapides : système COMMUTOR, *Revue générale des chemins de fer*, avril.
- JARVIS D., JARVIS J., MCFARLANE D.C., 2003. Achieving holonic control - an incremental approach, *Computers in Industry*, Vol. 51 (2), pp. 211-223
- JARVIS J., RÖNNQUIST R., MCFARLANE D., JAIN L., 2006. A team-based holonic approach to robotic assembly cell control, *Journal of Network and Computer Applications*, Vol. 29 (2-3), pp. 160-176
- JONES A.T., MCLEAN C.R., 1986. A Proposed Hierarchical Control Model for Automated Manufacturing Systems, *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 5 (1), pp. 15-26.
- JORION P., 1989. *Principe des systèmes intelligents*, Masson, Paris
- JUBIN M., 1994. Ateliers flexibles d'usinage, *Cahiers de l'Ingénieur*, R7 820
- KADAR B., MONOSTORI L., SZELKE E., 1998. An object-oriented framework for developing distributed manufacturing architectures, *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 9, pp. 73-179
- KALLEL G., 1985. *Proposition d'une conduite décentralisée coordonnée (CODECO) pour un atelier de fabrication*, Thèse de doctorat en sciences, INPG, Grenoble, juin
- KINTZIG C., POULAIN G., PRIVAT G., FAVENNEC P., 2002. *Les Objets Communicants*. Hermes Sciences Editions, Lavoisier, Paris
- KOESTLER A., 1967. *The ghost in the machine*, Editions Hutchinson, Londres
- KOESTLER A., 1978. *Janus*, Editions Hutchinson, Londres
- KOTAK D., WU S., FLEETWOOD M., TAMOTO H., 2003. Agent-based holonic design and operations environment for distributed manufacturing, *Computers in Industry*, Vol. 52 (2), pp. 95-108, DOI=[http://dx.doi.org/10.1016/S0166-3615\(03\)00101-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0166-3615(03)00101-5)
- KOUISS K., PIERREVAL H., MEBARKI N., 1997. Using multi-agent architecture in FMS for dynamic scheduling, *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 8 (1), pp. 41-47.
- KRAMER J., SCHEUTZ M., 2007. Development Environments for Autonomous Mobile Robots: A Survey, *Autonomous Robots*, Vol. 22 (2), pp. 101-132, DOI 10.1007/s10514-006-9013-8
- KUSUMI N., HIRASAWA K., OHBAYASHI M., 1998. Holonic decentralized control system under consideration of whole and part for large-scale complicated system, *Research Reports on Information Science and Electrical Engineering of*

- Kyushu University*, Vol. 3 (1), pp. 87-94
- KWON O., IM G. P., LEE K.C., 2007. MACE-SCM: A multi-agent and case-based reasoning collaboration mechanism for supply chain management under supply and demand uncertainties, *Expert Systems with Applications*, Vol. 33, pp. 690–705
- LEITÃO P., RESTIVO F., 2002. Agent-Based Holonic Production Control, In: *Proceedings of the 13th International Workshop on Database and Expert Systems Applications (DEXA'02)*, pp. 589
- LEITÃO P., COLOMBO A.W., RESTIVO F., 2003. An Approach to the Formal Specification of Holonic Control Systems, In: *Proceedings of HoloMAS 2003*, pp. 59-70
- LEITÃO P., RESTIVO F., 2006. ADACOR: A holonic architecture for agile and adaptive manufacturing control, *Computers in Industry*, Vol. 57, pp. 121-130
- LEITÃO P., RESTIVO F., 2008. ADACOR: A holonic approach to dynamic manufacturing scheduling, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 24, pp. 625–634
- LEMOIGNE J.L., 1977. *La Théorie du Système Général, théorie de la modélisation*, Presses Universitaires de France
- LEMOIGNE J.L., 1974. *Les systèmes de décision dans les organisations*, Presses Universitaires de France
- LI X., WANG Q., 2007. Coordination mechanisms of supply chain systems. *European Journal of Operational Research*, Vol. 179 (1), pp. 1-16
- LIU J., JIN X.L., TSUI K.C., 2004. *Autonomy Oriented Computing (AOC): From Problem Solving to Complex Systems Modeling*, Kluwer Academic Publishers / Springer.
- LIU J., JIN X.L., TSUI K.C., 2005. Autonomy Oriented Computing (AOC): Formulating computational systems with autonomous components. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part A: Systems and Humans*, Vol. 35 (6), pp. 879–902.
- LIU J., JING H., TANG Y.Y., 2002. Multi-agent oriented constraint satisfaction. *Artificial Intelligence*, Vol. 136 (1), pp. 101–144.
- LORINO Ph., 1991. *Le contrôle de gestion stratégique - La gestion par les activités*, Dunod Entreprise
- MANIER H., 1995. *Contribution au pilotage d'ateliers flexibles réactifs*, Thèse de Doctorat en Sciences, Université de Franche-Comté, 17 janvier
- MARIK V., MCFARLANE D., 2005. Industrial adoption of agent-based technologies, *IEEE Intelligent Systems*, Vol. 20 (1), pp. 27-35.
- MARKUS A., YANEZA T., MONOSTORI L., 1996. A market approach to holonic manufacturing. *Annals of the CIRP* Vol. 45 (1), pp. 433-436.
- MASSÉ G., PUJO P., BERTRAND J.C., 1994, Towards a mechatronics architecture of industrial robots, In: *Proceedings of the 2ème Congrès Franco-Japonais de Mécatronique, Japon*, Novembre
- MASSOTTE P., 1999. Auto organisation dans les structures et les systèmes complexes, *MOSIM'99*, Annecy
- MATTERN F., 2003. From Smart Devices to Smart Everyday Objects. In: *Proceedings of Smart Objects Conference (sOc'2003)*, Grenoble, France, pp. 15-16.
- MATHEWS J., 1995. Organizational foundations of intelligent manufacturing systems - the holonic viewpoint. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, Vol. 8 (4), pp. 237-243
- MATURANA F., NORRIE D.H., 1996. Multi-agent mediator architecture for distributed manufacturing, *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 7, pp. 257-270
- MATURANA F., NORRIE D.H., 1997. Distributed decision-making using the contract net within a mediator architecture, *Decision Support System*, Vol. 20, pp. 53-64.
- MATURANA F., W. SHEN, D.H. NORRIE, 1999. MetaMorph: An adaptive agent-based architecture for intelligent manufacturing, *International Journal of Production Research*, Vol. 37 (10)
- MC CULLOCH W. S., 1945. A Hierarchy of values Determined by the Topology of Nervous Nets, *Bull. math. biophys.*, Vol. 7, pp. 89-93
- MC DONALD A., 1993. MES help drive competitive gains in discrete industries, *Instrumentation & Control Systems*, pp. 69-72
- MCFARLANE D.C., 1995. Holonic Manufacturing Systems in Continuous Processing: Concepts and Control Requirements, In: *Proceedings of the Advanced Summer Institute (ASI) 95 of the N.O.E. on Intelligent Control of Integrated Mfg. Systems*, Lisbonne, Portugal, 25-28 Juin

- McFARLANE D., SARMA S., CHIRN J.L., WONG C.Y., ASHTON K., 2002. The intelligent product in manufacturing control and management. In: *Proceedings of the 15th Triennial IFAC World Congress*, Barcelona, Spain.
- McFARLANE D., SARMA S., CHIRN J.L., WONG C.Y., ASHTON K., 2003. Auto ID systems and intelligent manufacturing control, *Engineering Application of Artificial Intelligence*, Vol. 16 (4), pp. 365-376
- McFARLANE D., BUSSMANN K., 2003. Holonic Manufacturing Control: Rationales, Developpements and Open Issues, In: *Agent-based manufacturing: Advances in the holonic approach*, pp. 303–326, Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag (S. M. DEEN Ed.), ISBN 3-540-44069-0
- McFARLANE D.C., MARIK V., VALCKENAERS P., 2005. Intelligent control in the manufacturing supply chain, *IEEE Intelligent Systems*, Vol. 20 (1), pp. 24-26
- McFARLANE D.C., SHAW A., 2006. The challenge of unified RFID, *Sensor Review*, Vol. 26 (2)
- McFARLANE D.C., KULKARNI A.G., RALPH D., 2007. Value of RFID in remanufacturing, *Journal of Service Operations and Informatics*, Vol. 2 (3), pp. 225-252.
- MC GEHEE J., HEBLEY J., MAHAFFEY J., 1994. The MMST computer-integrated manufacturing system framework, *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, Vol. 7(2), pp. 107-115
- MEBARKI N., PIERREVAL H., KOUISS K., 1996. Une approche multi-agents pour l'ordonnancement dynamique d'un système de production flexible, *Ingénierie des Systèmes d'Information*, Vol. 4 (5), pp. 621-636.
- MEINADIER J. P., 1998. *Ingénierie et intégration des systèmes*, Hermès, Paris, ISBN 2-86601720- X.
- MEKAOUCHE L., 2007. *Pilotage holonique auto-organisé de réseaux logistiques : validation par modélisation et simulation distribuée*, Thèse de Doctorat, Université Paul Cézanne d'Aix-Marseille.
- MEKAOUCHE L., OUNNAR F., PUJO P., GIAMBIASI N., 2009. Another way to manage a supply chain: holonic and multicriteria approach, in: *Logistics Systems and Management*, Vol. 5 (3/4), pp. 396-417
- MELESE J., 1972. *Approche Modulaire des Systèmes de Gestion*, Editions Hommes & Techniques
- MELNIK S.A., CARTER P.L., 1987. Production Activity Control, *The Business ONE Irwin/APICS Series in Production Management*, Richard D. Irwin, Inc.
- MERCÉ C., 1987. *Cohérence des décisions en planification hiérarchisée*, Thèse de doctorat d'Etat, Université Paul Sabatier, Toulouse
- MES M., VAN DER HEIJDEN M., VAN HILLEGERSBERG J., 2008. Design choices for agent-based control of AGVs in the dough making process, *Decision Support Systems*, Vol. 44 (4), pp. 983-999
- MESAROVIC M.D., MACKO D., TAKAHARA J., 1970. *Theory of Hierarchical Multilevel Systems*, Academic Press, New York (édition française Economica, 1980)
- METZGER M., POLAKÓW G., 2007. Holonic Multiagent-Based System for Distributed Control of Semi-industrial Pilot Plants, (*HoloMAS 2007*) *LNAI*, Vol. 4659, pp. 338-347
- MICHEL P., 1988. *Contribution à la réalisation d'une commande décentralisée d'un axe de robot manipulateur*, Thèse de Doctorat en Sciences, Université d'Aix-Marseille III, LAIM, Avril
- MINTZBERG H., 1982. *Structure et dynamique des organisations*, Editions d'Organisation, Paris
- MOGNOL P., ANSELMETTI B., 1994. Automatic Process Planning In Turning: Generation By Progressive Evaluation, *Journal of Design and Manufacturing*, vol 4
- MOISE G., 2008. An Agent-holon Oriented Methodology to Build Complex Software Systems, *Int. J. of Computers, Communications & Control*, Vol. III, pp. 402-407, ISSN 1841-9836
- MOREL G., IUNG B., 1997. Balancing between Integration and Distribution Paradigms : the Modelling Process of the European CMMS-IAMS Projects , *Research Report ESPRIT, Project 21.859, EI-IC Vol. 1 : Enterprise Engineering and Integration: Building International Consensus*, In: *Proceedings of the ICEIMT'97*, pp. 339-347, Springer, ISBN 3-540-63402-9
- MOREL G., PANETTO H., ZAREMBA M., MAYER F., 2003. Manufacturing enterprise control and management system engineering: rationales and open issues, *IFAC Annual Reviews in Control*, Vol. 27 (2), pp. 199-209
- MOREL G., P. VALCKENAERS, J.-M. FAURE, C. PEREIRA, C. DIETRICH, 2007. Manufacturing plan control challenges and issues, *Control Engineering Practice*, Vol. 15 (11), p.1321-1331.
- MORIWAKI T., SUGIMURA N., MARTAWIRYA Y.Y., WIRJOMARTONO S.H., 1992. Production Scheduling in Autonomous Distributed Manufacturing System, In: *Quality Assurance Through Integration of Manufacturing Processes and Systems*, PED-v56 (New York, ASME)
- MORVAN G., JOLLY D., VEREMME A., DUPONT D., CHARABIDZE D., 2008. Vers une méthode de modélisation

- multi-niveaux. Dans : *Actes de la 7^{ème} Conférence Internationale de MOdélisation and SIMulation - MOSIM'08*, Paris – France
- MÜLLER J., PISCHEL M., 1993. The Agent Architecture InterRAP: Concept and Application, Tech. Rep. No. RR-93-26, Research Center for Artificial Intelligence (DFKI GmbH), Saarbrücken
- MULLER J.P., PARUNAK H.V.D., 1998. Multi-Agent Systems and Manufacturing, In: *Proceedings of INCOM'98*, Nancy-Metz
- NEUBERT G., 1997. *Contribution à la spécification d'un pilotage proactif et réactif pour la gestion des aléas*, Thèse de Doctorat, INSA de Lyon.
- NEUNREUTHER E., IUNG B., MOREL G., LEGER J.B., 1997. Engineering Process Modelling of an Intelligent Actuation and Measurement System : from the Users' needs to the Implementation. In: *Proceedings of the 4th IFAC Workshop on Intelligent Manufacturing Systems, IMS'97*, pp. 69-74, July 21-23, Séoul, Korea
- NG A.H.C., YEUNG R.W.H., CHEUNG E.H.M., 1996. HSCS - The design of a holonic shopfloor control system, In: *the proceedings of IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (EFTA '96)*, Vol. 1, pp. 179-185, 18-21 Nov, Kauai, HI, USA
- NGUYEN K., 1996. Flexible computer integrated manufacturing systems, In: *Proceedings of the SEMICON Taiwan 96 IC Seminar*, Taipei, Taiwan, R.O.C., pp. 241-247
- OKONGWU U., 1990. *Contribution à la formalisation du concept de flexibilité des systèmes industriels : étude de cas pratiques*, Thèse de Doctorat en Sciences, Institut National Polytechnique de Lorraine, décembre
- OLIVE J.M., 1990. *Contribution à l'étude et à la réalisation d'un système de supervision d'un tour industriel*, Thèse de Doctorat en Sciences. Université d'Aix-Marseille III, LAIM, Février
- OLIVE J.M., PUJO P., BERTRAND J.C., 1995. Opérateurs modulaires de pilotage d'axes pour machines outils et robots, *congrès du Club EEA*, Angers
- ÖREN T., 2001. Advances in Computer and Information Sciences: From Abacus to Holonic Agents, *Turk J Elec Engin*, Vol. 9 (1)
- OUNNAR F., 1999. *Prise en compte des aspects décision dans la modélisation par réseaux de Petri des systèmes flexibles de production*, Thèse de Doctorat en Sciences, Institut National Polytechnique de Grenoble, 9 décembre
- OUNNAR F., PUJO P., 2001. Décentralisation des mécanismes de pilotage de la relation donneurs d'ordres/fournisseurs, Dans : *Actes du 4^{ème} Congrès International de Génie Industriel*, Vol. 2, pp. 1175–1185, Aix-en-Provence, Marseille
- OUNNAR F., LADET P., 2004. Consideration of machine breakdown in the control of flexible production systems, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 17 (1), 69-82
- OUNNAR F., PUJO P., MEKAOUICHE L., GIAMBIASI N., 2007. Customer-supplier relation-ship management in an intelligent supply chain network. *Production Planning & Control*, 18(5), p. 377–387
- OUNNAR F., PUJO P., MEKAOUICHE L., GIAMBIASI N., 2009. Integration of a flat holonic form in an HLA environment, *Journal of Intelligent Manufacturing*, DOI: 10.1007/s10845-008-0106-4
- PANETTO H., S. BAÍNA, G. MOREL, 2007. Mapping the IEC 62264 models onto the Zachman framework for analysing products information traceability: a case study, *Journal of Intelligent Manufacturing* 18 (6) 679-698
- PANNEQUIN R., A. THOMAS, 2006. Cooperation between business and holonic manufacturing decision systems. In: *Proceedings of the 12th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing (INCOM'2006)*, mai, St Etienne, p. 423-428.
- PANNEQUIN R., 2008. *Proposition d'un environnement de modélisation et de test d'architectures de pilotage par le produit de systèmes de production*. Thèse de Doctorat en Sciences, Université Henry Poincaré, Nancy
- PANNEQUIN R., THOMAS A., MOREL G., 2008. Proposition d'un environnement d'évaluation pour la mise en œuvre d'un pilotage par le produit. Dans : *Actes de la 7^{ème} Conférence Internationale de MOdélisation and SIMulation - MOSIM'08*, Paris – France
- PARUNAK H.V.D., 1996. Applications of Distributed Artificial Intelligence in Industry, In: *Foundations of Distributed Artificial Intelligence*, Chap. 4. G.M.P., J. Wiley (Q'HARE ET N.R. JENNINGS Eds.), pp. 139-164.
- PARUNAK H. V. D., SAVIT R., RIOLO R. L., 1998. Agent-Based Modeling vs. Equation-Based Modeling: a Case Study and Users'Guide. In: *Multi-Agent Systems and Agent-Based Simulation*, SpringerVerlag (J. S. SICHMAN, R. CONTE AND N. GILBERT Eds)
- PATRITI V., 1998. *Systèmes de pilotage auto organisés et gammes distribuées : méthode de conception et application à une machine-*

outil, Thèse de Doctorat en Sciences, Université de Nancy I

PAULK M.C., CURTIS B., CHRISSIS M.B., WEBER C.V., 1993. *Capability Maturity Model for Software Version 1.1*, Technical Report CMU/SEI-93-TR-024, SEI, Carnegie Mellon University

PÉTIN J.-F., GOUYON D., MOREL G., 2007. Supervisory synthesis for product-driven automation and its application to a flexible assembly cell, *Control Engineering Practice*, Vol. 15 (5), pp. 595-614

PÉTIN, J.F. 2007. *Méthodes et modèles pour un processus sûr d'automatisation*, Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches, Centre de recherche en automatique de Nancy - CRAN - CNRS : UMR7039 - Université Henri Poincaré - Nancy I - Institut National Polytechnique de Lorraine - INPL

PFEIFER T., STÖBLER P., 1991. Networks as a basis for production-integrated quality management, Computer Integrated Manufacturing, In: *Proceedings of the Seventh CIM-Europe Annual Conference*, Turin, Italie, 29-31 Mai

PFEIFFER A., B. KADAR, L. MONOSTORI, 2003. Evaluating and Improving Production Control Systems by using Emulation, In: *Proceedings of the IC on Applied Simulation and Modelling, (ASM 2003)*, September 3-5, Marbella, Spain, pp.:261-267.

POLI R., 2007. *An Analysis of Publications on Particle Swarm Optimisation Applications*, University of Essex, Technical Report CSM-469, ISSN: 1744-8050, may

PUJO P., 1988. *Contribution à la programmation de tâches dans les Systèmes de Production Automatisés Flexibles*, DEA d'Automatique et d'Informatique XIAO, Université d'Aix-Marseille III, LAIM, Septembre

PUJO P., BERTRAND J.C., 1993. La décentralisation de l'ordonnancement : une solution pour augmenter la flexibilité et la réactivité des systèmes avancés de production, Dans : *Actes du 4ème Congrès International de Génie Industriel*, Marseille, France, Décembre

PUJO P., 1993. Robsilon : un outil de simulation pour appréhender et identifier des caractéristiques métrologiques sur les robots industriels polyarticulés, Dans : *Actes du 6ème Congrès International de Métrologie*, Lille, France, Octobre

PUJO P., 1994. *Contribution à la définition d'une modélisation technologique des robots industriels*, Thèse de Doctorat en Sciences, spécialité : "Automatique et Informatique", Université d'Aix-Marseille III, Novembre

PUJO P., OUNNAR F., 2001. Proposition d'un pilotage décentralisé, auto organisé et rapproché pour système automatisé flexible ; application à un Hub de transbordement robotisé fer/fer, *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, Vol. 35 (7-8), pp. 905-932

PUJO P., BRUN-PICARD D., 2002. Pilotage sans plan prévisionnel ni ordonnancement préalable, Dans : *Collection IC2 - Productique : Méthodes du pilotage des systèmes de production*, Hermès Science Europe Ltd (P. PUJO, J.P. KIEFFER, Eds.)

PUJO P., M. PEDETTI, F. OUNNAR, 2004. Pilotage proactif des lignes de production kanban par modélisation DEVS et simulation temps réel, dans : *Actes de MOSIM'04*, Nantes, France, 1-3 septembre.

PUJO P., OUNNAR F., ZANNI C., 2006. A self organized holonic control for mechatronics complex systems: application to a robotized car park, In: *International Journal of Automation Austria (IJAA)*, vol. 13 (special issue 2005), pp. 115-126, (ISSN 1562 – 2703)

PUJO P., PEDETTI M., GIAMBIASI N., 2006. Formal DEVS modelling and simulation of a Flow-Shop relocation method without interrupting the production, *Simulation Modelling Practice and Theory (SIMPRAT)*, vol. 14, pp. 817–842.

PUJO P., OUNNAR F., 2008. Un modèle holonique et isoarchique pour le pilotage d'un job shop en flux tiré. Dans : *Actes de la 7ème Conférence Internationale de Modélisation and SIMulation - MOSIM'08*, Paris – France, avril

PUJO P., OUNNAR F., 2008. Pull System Control for Job Shop Via a Holonic, Isoarchic & Multicriteria Approach. In: *Proceedings of the 17th IFAC World Congress*, Séoul - Corée, 6-11 juillet

REKIK Y., SAHIN E., DALLERY Y., 2008. Analysis of the impact of the RFID technology on reducing product misplacement errors at retail stores. *International Journal of Production Economics*, Vol. 112 (1), pp. 264-278

RICCARDI V., PUJO P., FRYDMAN C., 2003. DEVS modelling for the proactive control by simulation of kanban production lines, In: *Proceedings of the International Workshop on Modeling & Applied Simulation (MAS 2003)*, Italy, 2-4 octobre.

RODRIGUEZ S., HILAIRE V., KOUKAM A., 2007. A Holonic Approach to Model and Deploy Large Scale Simulations, In: *Multi-Agent-Based Simulation VII*, pp. 112-127, DOI - 10.1007/978-3-540-76539-4_9

RODRIGUEZ S., HILAIRE V., KOUKAM A., 2007. Towards a holonic multiple aspect analysis and modelling approach for complex systems: Application to simulation of industrial plants, *Simulation Modelling Practice and Theory*,

Vol. 15, pp. 521-543, doi:10.1016/j.simpat.2007.01.005

ROSSO R.S.U., ALLEN R.D., NEWMAN S.T., 2002. Future Issues for CAD/CAM and Intelligent CNC Manufacture, *In: Proceedings of the 19th International Manufacturing Conference – Queen's University Belfast – N. Ireland*

ROY D., 1998. *Une architecture hiérarchisée multi-agents pour le pilotage réactif d'ateliers de production*, Thèse de Doctorat, Université de Metz.

ROY D., ANCIAUX D., VERNADAT F., 2000. SYROCO: A Novel Multi-agents Shop-floor Control System. *Journal of Intelligent Manufacturing*, Chapman & All.

SAAD A., KAWAMURA K., BISWAS G., 1995, Evaluation of Contract Net-Based Heterarchical Scheduling for Flexible Manufacturing Systems, *In: Proceedings of the 1995 International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI'95), Workshop on Intelligent Manufacturing*, Montreal, Quebec, Canada, August 20-25, 1995

SAATY T.L., 1980. *The Analytic Hierarchy Process*, Mc Hill.

SAATY T.L., 1996. *Decision Making with Dependence and Feedback: The Analytic Network Process*. RWS Publications, Pittsburgh, PA

SAATY T.L., 2005. Theory and Applications of the Analytic Network Process, Decision Making with Benefits, Opportunities, Costs and Risks, RWS Publications, Pittsburgh, PA, ISBN-10: 1888603062.

SAINT GERMAIN B., VALCKENAERS P., VERSTRAETE P., HADELI K., VAN BRUSSEL H., 2007. A multi-agent supply network control framework, *Control Engineering Practice*, Vol. 15 (11) pp. 1394-1402

SAMANICH N. J., 1993. Understand your requirements before choosing an MES, *Manufacturing Systems*, pp. 34-39

SCHILLO M., FISCHER K., 2003. Holonic Multiagent Systems. *Zeitschrift für Künstliche Intelligenz*, Vol. 17 (4), pp. 54-55

SCHILLO M., FISCHER K., 2004. A Taxonomy of Autonomy in Multiagent Organisation, (*AUTONOMY 2003*) *LNAI*, Vol. 2969, pp. 68-82

SCOTT D., 1996. Comparative advantage through manufacturing execution systems, *In: Proceedings of the SEMICON Taiwan 96 IC Seminar*, Taipei, Taiwan, R.O.C., pp. 227-236

SCHOLZ-REITER B., FREITAG M., 2007. Autonomous processes in assembly systems, *CIRP Annals*, Vol. 56 (2), pp. 712-729

SCHWEITZER F., 1997. Active Brownian Particles: Artificial Agents in Physics. *Stochastic Dynamics*, Vol. 484, pp. 358-371, Berlin, Springer.

SENEHI M.K., KRAMER TH.R., RAY S.R., QUINTERO R., ALBUS J.S., 1994. Hierarchical Control Architectures from Shop level to End Effectors, *In: Computer Control of Flexible Manufacturing Systems, Research and Development*, New York: Chapman & Hall (S.B. JOSHI and J.S. SMITH, eds.), chap. 2, pp. 31-62

SHEN W., NORRIE D.H., 1999. Agent-based Systems for Intelligent Manufacturing: A State-of-the-Art Survey, *Knowledge and Information System*, Vol 1 (2), pp. 129-156

SILVA R. G., WILCOX S. J., REUBEN R. L., 2006. Development of a system for monitoring tool wear using artificial Intelligence techniques, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part B. Journal of Engineering Manufacture*, ISSN 0954-4054, Vol. 220 (8), pp. 1333-1346

SIMAO J.M., 2005. *Contribution au Développement d'un Outil de Simulation de Systèmes Holoniques de Production et Proposition d'un Meta-Modèle de Contrôle Holonique*, Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré & Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná (CEFET-PR) – Brasil

SIMAO J.M., STADZISZ P.C., MOREL G., 2006. Manufacturing execution systems for customized production, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 179 (1-3), pp. 268-275

SMITH R.G., 1980. The contract net protocol: high level communication and control in a distributed problem solver. *IEEE Transactions on Computers*, Vol. 29, pp. 1104-1113

SOHIER C., 1996. *Pilotage des Cellules Adaptatives de Production : apport des Systèmes Multi-Agents*, Thèse de Doctorat en Sciences, Ecole Normale Supérieure de Cachan

SONG H.S., KIM T.G., 1994. The DEVS framework for discrete event systems control, *In: Proceedings of the 5th Conference on AI, Simulation and Planning in High Autonomous Systems*, Gainesville, USA, pp228-234.

SOROOR J., TAROKH M.J., SHEMSHADI A., 2008. Initiating an state of the art system for real-time supply chain coordination, *European Journal of Operational Research*, DOI :10.1016/j.ejor.2008.03.008

SOSA P., RAMOS C., 1998. A Dynamic Scheduling Holon for Manufacturing Orders, *Journal of Intelligent Manufacturing - special issue on Agent-based Manufacturing*, Vol. 9 (2), pp. 107-112, April, Chapman & Hall, ISSN

0956-5515

- SOUSA P., RAMOS C., 1999. A distributed architecture and negotiation protocol for scheduling in manufacturing systems. *Computers in Industry*, Special issue on Life Cycle Approaches to Production Systems: Management, Control and Supervision, Vol. 38 (2), pp. 103-113
- SOUSA P., RAMOS C., NEVES J., 2000. Manufacturing Entities with Incomplete Information, *Studies in Informatics and Control Journal*, Vol. 9 (2), pp. 79-88
- SOUSA P., RAMOS C., NEVES J., 2003. The Fabricare Scheduling Prototype Suite: Agent interaction and knowledge base, *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 14 (5), pp. 441-455
- SOUSA P., RAMOS C., NEVES J., 2004. The Fabricare System: a multi-agent-based scheduling prototype, *Production Planning & Control*, Vol. 15 (2), pp. 156-165
- SUDA H., 1989. Future Factory System Formulated in Japan - Part 1, *Techno Japan*, Vol. 22, No. 10, pp. 15-25.
- SUDA H., 1990. Future Factory System Formulated in Japan - Part 2, *Techno Japan*, Vol. 23, No. 3, pp. 51-61
- SUGIYAMA S., 2001. Holonic management method, In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, Vol.5, pp. 2817-2822
- Sünder C., Zötl A., Christensen J.H., Vyatkin V., Brennan R., Valentini A., Ferrarini L., Strasser T., Martinez-Lastra J.L., Auinger F., 2006. Usability and Interoperability of IEC 61499 based distributed automation systems, In: *Proceedings of the IEEE Int. Conference on Industrial Informatics (INDIN'06)*
- TAMURA S., SEKI T., HASEGAWA T., TANAKA T. 2003, Toward the Practical Uses of Holonic Manufacturing Systems, *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, E86-A,11, pp. 2722-2730
- TANIMIZU Y., MIYAMAE T., SAKAGUCHI T., IWAMURA K., SUGIMURA N., 2007. Multi-objective Reactive Scheduling Based on Genetic Algorithm, In: *Proceedings of the 11th International Conference on Precision Engineering (ICPE)*, August 16–18, Tokyo, Japan, pp.65-70
- TCHIKOU M., GOUARDÈRES E., 2002. Multi-agent Model to Control Production System: A Reactive and Emergent Approach by Cooperation and Competition between Agents, In: *Proceedings of Agent Technologies, Infrastructures, Tools, and Applications for E-Services*, Erfurt, Germany, pp. 329-342, *Lecture Notes in Computer Science*, Springer, DOI 10.1007/3-540-36559-1_24
- TETI R., KUMARA S.R.T., 1997. Intelligent Computing Methods for Manufacturing Systems, *Annals of the CIRP*, Vol. 46 (2), pp. 629-652
- TERZI S., CASSINA J., CHIARI G., PANETTO H., 2004. Traçabilité des produits : une approche holonique, Dans : *Actes de la 5^{ème} Conférence Internationale de MODélisation and SIMulation - MOSIM'04*, Nantes – France
- TERZI S., PANETTO H., MOREL G., GARETTI M., 2007. A holonic metamodel for product traceability in Product Lifecycle Management, *International Journal of Product Lifecycle Management*, Vol. 2 (3), pp. 253 - 289
- THARUMARAJAH A., 2001. Survey of resource allocation methods for distributed manufacturing systems. *Production Planning & Control*, Vol. 12, n°1, pp. 58-68
- THOBEN K. D., JAGDEV H., ESCHENBAECHER J., 2001. Extended Products: evolving traditional product concepts. In: *Proceedings of the 7th International Conference on Concurrent Enterprising, Engineering the Knowledge Economy through Co-operation*, Bremen, Germany, pp. 429-439.
- THOMAS A., KLEIN T., EL HAOUZI H., BELMOKHTAR S., 2008. Architecture de systèmes contrôlés par le produit pour un environnement en juste à temps. Dans : *Actes de la 7^{ème} Conférence Internationale de MODélisation and SIMulation - MOSIM'08*, Paris – France
- TITLI A., 1979. *Analyse et Commande des Systèmes Complexes*, Cepadues Editions
- TOBIAS R., HOFMANN C., 2004. Evaluation of free Java-libraries for social-scientific agent based simulation, *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, Vol. 7 (1), <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/7/1/6.html>
- TRANVOUEZ E., ESPINASSE B., CHIRAC J.P., 1998. A multi-agent based scheduling system: a cooperative and reactive approach, In: *Proceedings of INCOM'98*, Nancy-Metz
- TRANVOUEZ E., 2001. *LAD et ordonnancement : une approche coopérative du réordonnancement par systèmes multi-agents*, Université de Droit d'Economie et des Sciences d'Aix-Marseille III
- TRENTESAUX D., 1996. *Conception d'un système de pilotage distribué, supervisé et multicritère pour les systèmes automatisés de production*, Thèse de Doctorat en Sciences, Institut National Polytechnique de Grenoble, 24 janvier

- TRENTESAUX D., 2002. *Pilotage hétérarchique des systèmes de production*, Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis.
- TRENTESAUX D., 2007. Les systèmes de pilotage hétérarchiques, *JESA*, 41 (9-10), p.1165-1202 - DOI:10.3166/jesa.41.1165-1202
- UDOKA S.J., 1992. The role of automatic identification (Auto ID) in the computer integrated manufacturing (CIM) architecture. *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 23 (1-4), pp. 1-5
- UDOKA S.J., 1991. Automated data capture techniques: A prerequisite for effective integrated manufacturing systems. *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 21 (1-4), pp. 217-221
- ULIERU M., 1997. Soft computing issues in the intelligent control of holonic manufacturing systems, *In: Proceedings of the 1997 IEEE Annual Meeting of the North American Fuzzy Information Processing Society*, NAFIPS'97, Syracuse NY, USA, pp. 323-328
- ULIERU M., STEFANOIU D., NORRIE D.H., 2000. Holonic Self-Organization Of Multi-Agent Systems By Fuzzy Modeling With Application To Intelligent Manufacturing, *In: Proceedings of the IEEE SMC'2000, 8-11 october; Nashville, USA*
- UHRMACHER A. M., 1997. Concepts of object- and agent-oriented simulation, *Trans. Soc. Comput. Simul. Int.*, Vol. 14 (2), pp. 59-67
- UNLAND R., 2003. A holonic multi-agent system for robust, flexible, and reliable medical diagnosis, (*OTM 2003 workshops (Catania, 3-7 November)*) *Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 2889, pp. 1017-1030
- VALCKENAERS P., BONNEVILLE F., VAN BRUSSEL H., BONGAERTS L., WYNS J., 1994. Result of the Holonic Control System Benchmark at KU Leuven, *In: Proceedings of the 4th International Conference on Computer Integrated Manufacturing and Automation Technology (CIMAT)*, Troy, USA, Oct 10-12, pp. 128-133
- VALCKENAERS P., VAN BRUSSEL H., BONGAERTS L., 1995. Programming, scheduling, and control of flexible assembly systems, *Computers in Industry*, Vol. 26, pp. 209-218
- VALCKENAERS P., HADELI K., SAINT GERMAIN B., VERSTRAETE P., VAN BRUSSEL H., 2007. MAS coordination and control based on stigmergy, *Computers in Industry*, Vol. 58 (7), pp. 621-629
- VALENCIA-JIMENEZ J.J., FERNANDEZ-CABALLERO A., 2006. Holonic Multi-agent Systems to Integrate Independent Multi-sensor Platforms in Complex Surveillance, *In: Proceedings of the IEEE International Conference on Video and Signal Based Surveillance*, Nov., pp. 49-49
- VAN BERTALANFFY L., 1969. *General System Theory*, New-York (traduction française, Dunod, 1973)
- VAN BRUSSEL H., WYNS J., VALCKENAERS P., BONGAERTS L., PEETERS P., 1998. Reference architecture for holonic manufacturing systems: PROSA. *Computers in Industry*, Vol. 37, pp. 255-274
- VAN BRUSSEL H., BONGAERTS L., WYNS J., VALCKENAERS P., VAN GINDERACHTER T., 1999. A conceptual framework for holonic manufacturing: Identification of manufacturing holons, *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 18 (1), pp. 35-52
- VAN LEEUWEN E.H., ET NORRIE D., 1997. Intelligent Manufacturing: Holons and Holarchies, *Manufacturing Eng.*, Vol. 76 (2), pp. 86-88
- VERSTRAETE P., VALCKENAERS P., VAN BRUSSEL H., SAINT GERMAIN E., HADELI K., VAN BELLE J., 2008. Towards robust and efficient planning execution, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol. 21, pp. 304-314
- VINCKE P., 1989. *L'aide multicritère à la décision*, Editions de L'université de Bruxelles.
- WALKE Ch., 2005. *Entwurfsprozess für verteilte Steuerungen mit UML 2.0 und IEC 61499*, Diplomarbeit, Technische Universität Kaiserslautern
- WANG L., 2001. Integrated design-to-control approach for holonic manufacturing systems. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 17, pp. 159
- WANG F., HOU Z.-G., XU D., TAN M., 2005. An agent-based holonic architecture for reconfigurable manufacturing systems, (*Advances in natural computation (Changsha, 27-29 August)*) *Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 3612, PART III, pp.622-627
- WANG F., XU D., TAN M., WAN Z., 2005. A holonic architecture for reconfigurable manufacturing systems, *In: Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology*, 14-17 Dec, pp. 905-909, ISBN: 0-7803-9484-4
- WEBB K., 2007. Xholon – an Agent Based Modeling (ABM) tool based on “Monkey Topology”, *SwarmFest 2007*, DePaul University, CTI, Chicago, Illinois, USA

- WIENER N., 1958. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*, Hermann, Paris
- WILBER K., 1995. *Sex, Ecology, Spirituality : The Spirit of Evolution*. Shambhala Publications Inc, ISBN 1-57062-744-4
- WILBER K., 2000. *A Theory of Everything: an integral vision for business, politics, science and spirituality*, Shambhala Publications Inc, ISBN 1-57062-724-x
- WONG C.Y., MCFARLANE D., ZAHARUDIN A.A., 2002. The intelligent product driven supply chain, *In: Proceedings of the IEEE International Conference on System, Man and Cybernetics*, Hammamet, Tunisie
- WONG T.N., LEUNG C.W., MAK K.L., FUNG R.Y.K., 2006. Dynamic shopfloor scheduling in multi-agent manufacturing systems, *Expert Systems with Applications*, Vol. 31 (3), pp. 486-494
- WONG C.Y., MCFARLANE D.C., 2007. Radio Frequency Identification data capture and its impact on shelf replenishment, *International Journal of Logistics*, Vol. 10 (1). pp. 71-93
- WYNS J., VAN GINDERACHTER T., VALCKENAERS P., VAN BRUSSEL H., 1997. Integration of resource allocation and process control in holonic manufacturing systems, *In: Proceedings of the 29th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems*, pp. 57-62.
- YANG Y., ZHAO F., YAO Y., ZHU A., 2006. A PSO and simulated annealing hybrid algorithm to task allocation problem for holonic manufacturing system, *In: Proceedings of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA'06)*, 21-23 june, Vol. 3, pp. 2830- 2833, 2006, Dalian, China
- YAO Y., LI Y., ZHAO F., YANG Y., 2006. A scheduling holon model with time Petri net and its solution with a novel PSO-GA algorithm *In: Proceedings of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA'06)*, 21-23 june, Vol. 3, pp. 2830- 2833, Dalian, China
- YOUSSEF D., 1998. *Architecture distribuée multi-experts avec contrôle hiérarchique pour le pilotage des systèmes de production*, Thèse de Doctorat en Sciences, Université de Metz, juin
- ZACHAREWICZ G., GIAMBIASI N., FRYDMAN C., 2006. Lookahead Computation in G-DEVS/HLA Environment, *Simulation News Europe Journal (SNE) special issue 1 'Parallel and Distributed Simulation Methods and Environments'*, Vol. 16 (2), pp. 15-24
- ZACHAREWICZ G., PUJO P., FRYDMAN C., GIAMBIASI N., 2009. Environnement G-DEVS / HLA pour la simulation distribuée de systèmes de production multi processus, *In: Journal of Decision System (JDS)*, Vol. 18, n°3, pp. 375-402, septembre
- ZHANG X., BALASUBRAMANIAN S., BRENNAN R., NORRIE D., 2000. Design and implementation of a real-time holonic control systems for manufacturing, *Information Sciences*, Vol. 127, pp. 23-44
- ZHANG J., GAO L., CHAN F.T.S., LI P., 2003. A holonic architecture of the concurrent integrated process planning system, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 139 (1-3), pp. 267-272
- ZHAO F., ZHANG Q., YANG Y., 2006. Petri net modeling method to scheduling problem of holonic manufacturing system (HMS) and its solution with a hybrid PSO algorithm, *Lecture Notes in Control and Information Sciences*, Vol. 344, pp. 361-372
- ZHAO F., ZHANG Q., WANG L., 2007. A hybrid algorithm based on PSO and GA to Dynamic Virtual Holon Mechanism and Negotiation Model, *In: Proceedings of ISKE 2007*
- ZHAO F., HONG Y., YU., YANG Y., ZHANG Q., YI H., 2007. A hybrid algorithm based on particle swarm optimization and simulated annealing to holon task allocation for holonic manufacturing system, *Int J Adv Manuf Technol*, Vol. 32, pp. 1021-1032, DOI 10.1007/s00170-006-0418-5
- ZHOU B., WANG L., NORRIE D.N., 1999. Design of Distributed Real-time Control Agents for Intelligent Manufacturing Systems, *In: Proceedings of the IMS Conference*, Leuven, Belgique, Sept. 22-24
- ZIMMERMANN J., MÖNCH L., 2007. Design and Implementation of Adaptive Agents for Complex Manufacturing Systems, *Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 4659, pp. 269-280

6. TIRÉS À PART DE QUELQUES PUBLICATIONS

Patrick Pujo, Nicolas Broissin, Fouzia Ounnar,

«PROSIS: An isoarchic structure for HMS control»,
Engineering Applications of Artificial Intelligence (EAAI).

Vol. 22, n° 3/4, pp. 1034-1045, doi:10.1016/j.engappai.2009.01.011.

Mars 2009.

Fouzia Ounnar, Patrick Pujo, Lynda Mekaouche, Norbert Giambiasi,

«Integration of a Flat Holonic Form in an HLA Environment»,
Journal of Intelligent Manufacturing (JIM).

Vol. 70, n° 1, pp. 91-111, DOI: 10.1007/s10845-008-0106-4.

Février 2009.

Fouzia Ounnar, Patrick Pujo, Lynda Mekaouche, Norbert Giambiasi

«Customers-Suppliers Relationship Management in an Intelligent Supply Chain»,
Production, Planning and Control (PPC).

Vol. 18, n° 5, pp. 377-387.

2007.

Patrick Pujo, Massimo Pedetti, Norbert Giambiasi,

«Formal DEVS modelling and simulation of a Flow-Shop relocation method without interrupting the production»,
Simulation Modelling Practice and Theory (SIMPRAT)

Vol. 14, pp. 817-842.

2006.

Fouzia Ounnar, Patrick Pujo,

«Supplier evaluation process within a self-organized logistical network»,
International Journal of Logistics Management (IJLM)

Vol. 16, n° 1, pp. 159-172.

2005.

